



Udvikling af brintpilleinjektorer med henblik på industriel markedsføring

Visler, T.

Publication date:
1988

Document Version
Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link back to DTU Orbit](#)

Citation (APA):
Visler, T. (1988). *Udvikling af brintpilleinjektorer med henblik på industriel markedsføring*. Risø National Laboratory. Risø-M No. 2707

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Udvikling af brintpilleinjektorer med henblik på industriel markedsføring

Torben Visler

Forskningscenter Risø, 4000 Roskilde, Danmark
September 1988

**UDVIKLING AF BRINTPILLEINJEKTORER
MED HENBLIK PÅ INDUSTRIEL
MARKEDSFØRING
EF 172**

TORBEN VISLER

**Rapport for en erhvervsforskeruddannelse under ATV
(Akademiet for de Tekniske Videnskaber)**

Uddannelsesperiode: 15/10-85 - 14/10-87

RISØ-M-2707

UDVIKLING AF BRINTPILLEINJEKTORER MED HENBLIK PÅ INDUSTRIEL MARKEDSFØRING

Torben Visler

Abstract.

1. Omtale af opbygning af installation af injektor ved ETA-BETA II
2. Opbygning og arbejde med to forskellige "pipe-guns". Den ene for store piller, diameter/længde = 4.5-5 mm/8-20 mm, og den anden for små piller, diameter/længde = 2 mm/3-4 mm.

September 1988
Forskningscenter Risø, DK-4000 Roskilde, Danmark

Godkendt som erhvervsforskerrapport for erhvervelse af erhvervsforsker-
graden under ATV.

ISBN 87-550-1421-6

ISSN 0418-6435

Risø Repro 1988

Indholdsfortegnelse.

Forord.....	5
Sammenfatning.....	7
Summary.....	13
Indledning (baggrund, formål, opbygning af rapport, afgrænsning, etc.....	19
Kapitel 1:	
afsnit 1.1: Introduktion til fusion og pilleinjektion.....	21
afsnit 1.2: Pilleinjektorens dimensionering afhængig af ekspe- rimentet: pillestørrelse, pillehastighed, repeti- tionsrate (enskuds vs. flerskuds).....	25
Kapitel 2:	
Pilleinjektorens udvikling/historie.....	29
Kapitel 3	
afsnit 3.1: Hvad består en injektor af?.....	37
afsnit 3.2: Er injektoren ens fra opgave til opgave? (sammenligning mellem injektorerne opstillet ved DANTE, TFR og ETA-BETA II).....	39
Kapitel 4:	
Gennemgang af Padova injektoren som eksempel.....	51
Kapitel 5:	
JET "Pipe-gun", 1-skuds, lav hastighed.....	61
Kapitel 6:	
"Pipe-gun", 1-skuds, høj hastighed.....	75
Konklusion.....	85
Litteraturliste.....	87

Bilag 1. Temperaturvariation mellem centersegmentet og et af ydersegmenterne.....	91
Bilag 2. Damptrykskurver for hydrogen og dets isotoper.....	93
Bilag 3. Brintpilleinjektormarkedet.....	95

FORORD

I forbindelse med en EFP-bevilling fra Energiministeriet til Risø på ca. 2 mio. kr. over en toårig periode til fortsættelse af udvikling af brintpilleinjektorer, blev det besluttet at etablere en erhvervsforskeruddannelse. Den dertil knyttede kandidat (undertegnede) skulle varetage videnoverførelsen mellem Risø plasmafysiksektion og virksomheden. Virksomheden, der udviste interesse for projektet, var Terma Elektronik A/S ved Århus.

Erhvervsforskeruddannelsen er under ledelse og delvis finansielt støttet af ATV (Akademiet for de Tekniske Videnskaber).

Uddannelsen og projektet blev etableret under navnet,

"Udvikling af brintpilleinjektorer
med henblik på industriel markedsføring"

EF 172

og løb i perioden 15/10-85 - 14/10-87.

Ledergruppen, der var ansvarlig for uddannelsen, var dr.phil. Vagn O.Jensen (Risø), dr.phil. Gunnar Sørensen (Det Fysiske Institut Århus) og divisionschef Ove Lundorf (Terma Elektronik A/S). I det daglige arbejde var det projektleder civ.ing. Hans Sørensen og tekniker Bjarne Sass, der stod for uddannelsen. Disse to personer er jeg megen tak skyldig.

SAMMENFATNING

Brintpilleinjektoren er emnet for denne rapport.

Injektion af brændstofpiller i plasmaeksperimentet er af stor vigtighed, da plasmaet løbende skal have tilført frisk brændstof for at kompensere dels for partikeltabet ved fusionsprocesserne, dels for partikeltabet ved diffusion af plasmapartiklerne ud til væggen omkring plasmaet.

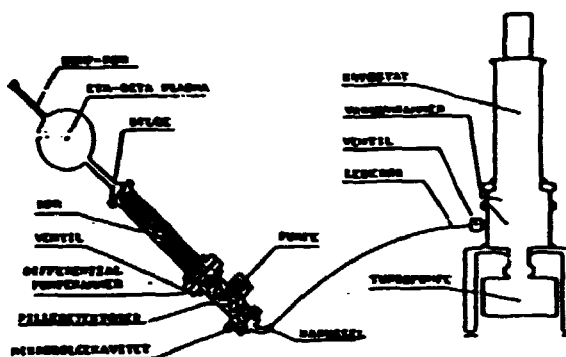
Risø-plasmafysiksektion arbejder teoretisk såvel som eksperimentelt. Et af de eksperimentelle områder drejer sig om udstyr til brændstoftilførsel til plasmaet ved piller, d.v.s. pilleinjektorer. Pillerne, der injiceres i eksisterende testreaktorer, er af fast brint og deuterium, derfor skal enheden, hvor pillen dannes (og lades i bøsselføret) køles ned med flydende helium ($T = 4.2 \text{ K}$).

Første gang pilleinjektion blev foreslået var i 1954 af Spitzer. Den første pilleinjektion fandt først sted ca. 20 år senere på Risø.

Accelerationsmekanismen har udviklet sig fra den relativt primitive mekaniske accelerationstype, der blev anvendt ved det første pilleinjektionseksperiment videre over til acceleration vha. komprimeret gas (pneumatiske injektor), vha. centrifugalkraften (centrifugalkraftinjektoren), vha. plasmaudladning ("arc-heated gun") samt vha. mere eksotiske accelerationsmetoder såsom laser-/elektronbeam-, "to-trin"- og skinnedåse acceleration.

Det voksende kendskab og den erhvervede "know-how" indenfor opbygning, konstruktion og forståelse af brintpilleinjektorer bevirkede, at Risø plasmafysiksektion fik etableret et samarbejde med Fontanay-aux-Roses i Frankrig om udlån af en pilleinjektor til brug ved deres tokamak TFR. Senere stod sektionen for en kommerciel levering af en pilleinjektor til det italienske institut, Istituto Gas Ionizzato i Padova i sommeren 1986. Denne injektor skulle injicere piller ind i en RFP (Reversed Field Pinch) ved navn ETA-BETA II. Kravet var små og langsomme piller, 100 m/s. Nedenfor er vist en skematisk opstilling af pilleinjektor inklusiv ETA-BETA II. (Figur 1).

Man besluttede at gøre to pillestørrelser mulige, 0,38 mm og 0,70 mm i diameter. Den kryogene del, hvor pillen blev dannet og accelereret, var under vakuum og omgivet af strålingsskærme for at opnå termisk isolation. Pillen blev dannet ved ekstrusion gennem en dyse, ladet i et bøsselføret og skudt ud af bøsselføret vha. komprimeret brintgas ved at aktivere en hurtigventil. Pillen fortsatte videre over i et indre lederør (af plastik) og videre ud gennem en



Figur 1.

Skematisk opstilling af
pilleinjektor og ETA-BETA II.

VAT-ventil, der var placeret på vakuumkammeret. VAT-ventilen definerer slutningen af kryostaten/indre-lederør og begyndelsen af det ydre lederør. Styringen af injektoren foregik automatisk vha. en PLC (Programable Logic Controller). Pilleren blev transporteret fra bøszen over til ETA-BETA II ved brug af et lederørssystem. Lederøret var et 4 m langt (plastik) rør med en lille indre diameter og en glat indervæg, hvorpå pillen kunne bevæge sig på en tynd film af fordampet egenmateriale. Pilleren blev injiceret skråt opad gennem et af ETA-BETA's radiære rør. Pilleren skulle bevæge sig ca. 1.2 m i fri flugt, derfor skulle spredningen på pillens retning være lille, $\pm 0.5^\circ$.

Lederøret sluttede op i et differentialpumpekammer, i hvilken de to diagnostiske enheder, pilledetektorer og mikrobølgekavitet, var placeret. Pilledetektorerne og mikrobølgekavitet blev henholdsvis brugt til at måle pillehastighed og -masse med.

På grund af plasmaets korte levetid, 2 ms, og pillens relativt lave hastighed, ≈ 100 m/s med en spredning på ca. $\pm 10\%$ i hastighed, ville spredningen i pillens ankomsttid, ≈ 5.4 ms, være større end plasmaets levetid. Derfor skulle injektoren triggere ETA-BETA II via pilledetektorsignalerne.

De to mulige pillestørrelser nævnt ovenfor viste sig at være utilstrækkelige ved deres eksperiment, de var for små. Derfor blev en ny pillestørrelse gjort mulig, hvis dimensioner var: diameter 1.5 mm og længde 3 mm. Denne ændring i pillestørrelsen illustrerer, hvor besværligt det er at beregne/forudsige pillestørrelsen (eller andre specifikationer på injektoren).

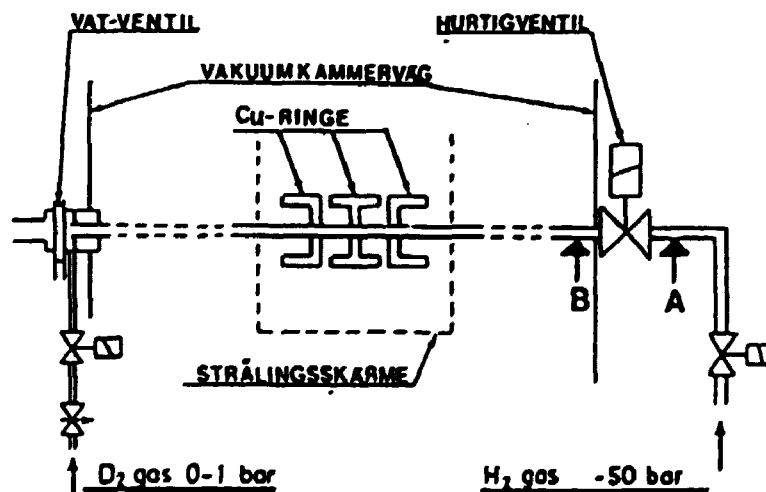
"Pipe-gun".

En anden metode at danne pillen på blev foreslået af Claudet og hans medarbejdere i Grenoble i Frankrig. Ved denne metode bliver pillen dannet ved "in-situ" kondensation i bøsseløbet, og bliver herefter skudt ud vha. en hurtigventil på samme måde som ved andre pneumatiske injektorer.

Franskmændenes og amerikanernes design er baseret på Claudets design. Frysecellen, hvor pillen dannes, bliver kølet ned til flydende heliums temperatur vha. en flow-kryostat. De to bøsseløb, fortil og bagtil, er koblet til frysecellen med flanger. Isolation mellem bøsseløbene og frysecellen blev opnået ved brug af spændringe af polyimid. Ved hjælp af heatere placeret på bøsseløbene kunne de etablere temperaturgradienter over spændringene, så pillen kun dannes i frysecellen.

Opbygning af en mere simpel "pipe-gun" har fundet sted på Risø. Denne er vist skematisk i figur 2 nedenfor. "Pipe-gun"en bestod af et ubrudt rør af enten rustfrit stål eller messing. Tre (eller flere) cirkulære segmenter bestående af udglødet elektrolytisk kobber var loddet på bøsseløbet. Segmenterne var i termisk kontakt med (bad)kryostaten via nogle udglødede kobbertråde, og til hvert segment var der tilsluttet en heater. Det bør bemærkes, at Risø bruger badkryostat, og amerikanerne/franskmændene bruger flowkryostat.

De (to) yderste segmenter var koblet mindre hårdt til kryostaten end center-



Figur 2.

Skematisk tegning af den
simplificerede "pipe-gun".

segmentet, så at der allerede eksisterede temperaturgradienter mellem segmenterne. Temperaturgradienterne og dermed beliggenheden af det sted i bøsse-løbet, hvor temperaturen svarer til triplepunkttemperaturen, kunne ændres via de ydre heatere. Man kan således i nogen grad styre pillens maksimale længde, idet kondensering af deuterium ikke kan ske ved en temperatur højere end 18.7 K (triplepunkttemperaturen).

Selve pillen bliver dannet ved, at gassen først kondenserer ved centersegmentet på bøsselobets overflade, hvor kryopumpningseffekten er kraftigst. Kondensationen fortsætter herefter ud over centersegmentet på overfladen af bøsselobet samtidig med, at der løbende bliver kondenseret gas på den allerede kondenserede gas ved centersegmentet. Kondensationen på bøsselobets overflade står på, indtil man når det sted i bøsselobet, hvor temperaturen netop svarer til fædetrykket, aflæst på damptrykskurven. Herefter vil gassen kun kondensere på allerede kondenseret gas.

To typer af ovennævnte "pipe-gun"s blev opbygget, en til store langsomme piller, 100-300 bar cm^3 , og en til relativt små, hurtige piller, 9-13 bar cm^3 .

Store piller.

Ved pilldannelsen blev der ledt gas ind fra begge sider af "pipe-gun"en. Pillen blev dannet "tosidet". Gasindledningen foregik igennem henholdsvis VAI-ventilen og et rør placeret mellem sikkerhedsventilen og hurtigventilen, Punkt A i figur 2. Hurtigventilen var af den kommercielle type Skinner.

Der blev fremstillet 3 "pipe-gun"s til store piller, hvis indre diameter var henholdsvis 3.2, 4.5 og 5 mm. Vægtykkelsen for det største bøsselob var 0.5 mm, men den var formindsket til 0.25 mm mellem segmenterne. Segmenterne var enten lavet af udglødet kobber eller af messing inderst og udglødet kobber yderst. Piller af længden 8-20 mm blev dannet ved et fædetryk på mellem 500-1000 mbar.

En opvarmning på 10-20 sekunder kort før affyring for at løsne pillen fra bøsselobets overflade bevirkede, at op til 30% af pillen fordampede. Herefter blev affyringen foretaget ved "pulsopvarmning", høj effekt afsat i kort tid. Herved fordampede kun op til 2% af pillen. Dette skyldes, at varmen ved "pulsopvarmningen" kun når at trænge ind i overfladen af pillen, hvorimod ved de 10-20 sekunders opvarmning når varmen ind i pillen.

Hastigheder mellem 60-200 m/s blev opnået ved hurtigventilaffyring, hvor af-

fyringstrykket lå mellem 150-2000 mbar. Delayet, tiden mellem hurtigventilen blev aktiveret og pillen rives løs, blev målt til 6-8 ms.

Selvaffyring af pillerne blev også konstateret. Når pillen opvarmes, vil det yderste lag af pillen fordampe. Det fordampede egenmateriale vil blive opvarmet og herved ekspandere, hvorefter det vil skyde pillen ud, inden hurtigventilen bliver aktiveret. Selvaffyring ved pulsopvarmning blev konstateret, når opvarmningstiden var længere end 0.5 sekund. Ved denne form for affyring får pillen 1) en blød start i forhold til hurtigventilaffyring og 2) en hermed lavere hastighed. Ved selvaffyring blev hastigheder på 30 og 150 m/s opnået for henholdsvis koldt og varmt dannede piller.

Piller dannet ved en temperatur på 8-9 K viste sig at være af bedst kvalitet. Piller, der blev dannet ved en lavere temperatur, var for porøse, og piller, der blev dannet ved en højere temperatur, havde en broget, uhomogen overflade. Pilledannelsestemperaturen afhang af fødetryk og heaterinput.

Små piller.

Ideen med opbygning af en 1-skuds "pipe-gun" var, at erfaringerne i forbindelse med indkøringen af denne skulle bruges til opbygning af en 3-skuds "pipe-gun" med samme (pille-)dimension/hastighed som 1-skuds-"pipe-gun"ens.

"Pipe-gun"en til små og hurtigere, 900-1200 m/s, piller havde en indre diameter på 2 mm og en godstykkelse på 0.3 mm. Tykkelsen af segmenterne, der var fremstillet i udglødet kobber, var 2 mm. "Pipe-gun"en blev først fremstillet i messing og senere i rustfrit stål. Rustfrit stål blev valgt som bøsselebmateriale, da dets temperaturgradient er lettere at styre.

De små piller blev i starten dannet "tosidet" ved at lede gas ind gennem henholdsvis VAI-ventilen og et lille tyndt rør loddet fast på bøsselebet, punkt B i figur 2. Rørets tværsnit skulle være mindre end bøsselebet for ikke at påvirke affyringstrykket. Endvidere skulle ventilen, der var placeret i starten af det tynde rør, lukke mod to trykveje, den ene trykvej var endda mod højtryk.

Pillens kvalitet afhang af (damp-)fødetrykket. Ved et højt fødetryk vil pillen strække sig et godt stykke ud over centersegmentet, hvorved pillen dannes ved forskellige temperaturer, pillen bliver uhomogen. Denne effekt er mindre udbredt ved et lavere (damp-)fødetryk.

Man bør derfor danne pillen ved et lavt fødetryk, da man får en kortere pille og en herved mere homogen/uniform pille.

Følgende resultater blev opnået:

$$\begin{array}{ll} P_{\text{føde}}: 200-500 \text{ mbar} & P_{\text{aff}}: 30-50 \text{ bar} \\ L_{\text{pille}}: 2-4 \text{ mm} & V_{\text{pille}}: 900-1200 \text{ m/s} \end{array}$$

"Ensidede" pilledannelse blev også gjort ved kun at sende gas ind gennem VAT-ventilen. Opstillingen blev herved simplificeret, dels ved at nogle af ventilerne kunne fjernes, dels ved at det tynde rør kunne fjernes.

Ved et fødestryk på: 30-40 mbar og
et affyringstryk på: 30 bar blev
hastigheder på: 900 m/s opnået.

Kvaliteten af pillerne var ikke så god, at de kunne overleve et højere affyringstryk. Ved et lavere fødestryk, 20-10-4 mbar, og stærke temperaturgradienter fik vi hele og pæne piller. Dannelsesstemperaturen lå omkring 8.5 K ($\approx 280-300$ ohm).

Da den "ensidede" pilledannelse resulterede i en forenkling af opbygningen af injektoren, vil en sådan forenkling også resultere i en prismæssig billigere injektor.

SUMMARY

Report concerning the pellet injector.

The injection of fuel pellets into a plasma experiment is of major importance since the plasma has to be refueled in order to compensate for particle loss by fusion processes and for diffusion of particles to the wall surrounding the plasma.

The plasmaphysic department at Risø carries out as well theoretical as experimental research. One of the experimental fields is the design and construction of a device for the injection of fuel to the plasma by pellets, known as the pellet injector.

As the pellets, which are being injected into test reactors are made of solid hydrogen and deuterium, the unit in which the pellets are produced is cooled by liquid helium ($T = 4.2$ K).

In 1954 Spitzer first suggested the injection of pellets. Almost 20 years later the first injection was performed at Risø.

The firing mechanism has developed from the relatively primitive mechanical type which was used at the first experiment, to firing mechanisms using compressed air (pneumatic injector), centrifugal power (centrifugal power injector), arc-heating (arc-heated gun) and later on to more exotic acceleration mechanisms as laser-/electronbeam-/ two-stage-/ and railgun acceleration.

Owing to the increasing knowledge of the pellet injector an agreement about collaboration between Centre d'Etudes Nucleaires at Fontenay-aux-Roses and Risø was established. According to the agreement Risø was to deliver a pellet injector to be used at the French TFR-tokamak. Later on Risø commercialized the deliverance of a pellet injector to the Italian Institute, Istituto Gas Ionizzato in Padova. The purpose of the device was the injection of pellets into their RFP (Reversed Field Pinch) ETA.BETA II. The Italian institute required small and slow pellets, 100 m/s.

It was decided that two pellet sizes should be available, 0.38 and 0.70 mm diameter. The cryogenic unit in which the pellets were made and accelerated was placed under vacuum and surrounded by radiation shields. The pellet was punched out of an extruded ribbon of solid deuterium, loaded into the gunbarrel and was then blown out through the gunbarrel with a burst of hydrogen propellant gas by activating a fast valve. The pellet sped through an inner guide tube (plastic) and further out through a VAT valve, attached to the vacuum

Figure 1: A schematic display of the pellet injector.

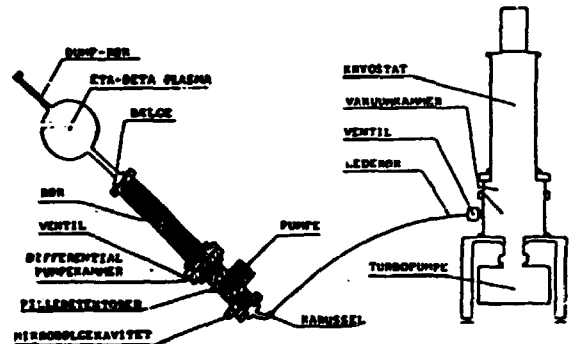


Figure 1.

chamber. The VAT valve defines the end of the gun and the beginning of the outer guide tube. The gun was operated automatically by a PLC (Programmable Logic Controller).

The pellet is transported from the gun to ETA-BETA II by a guide tube system. The guide tube was a 4 m long (plastic) tube with a small inner diameter and a smooth inner wall, on which the pellet could move on a thin film of evaporated pellet material. The pellet was injected into the plasma through one of the ETA-BETA II's radial tubes. As the pellet had an unrestrained motion of 1.2 m during the process a deviation of less than $\pm 0.5^\circ$ was imperative. The guide tube led into a differential pumping chamber in which the two diagnostic units, pellet detectors and microwave cavity, were placed. The pellet detectors and microwave cavity were used for measuring pellet velocity and -mass.

Owing to the short lifetime of the plasma, 2 ms, and the low velocity of the pellet, 100 m/s, with a scatter of $\pm 10\%$, the scatter in arrival time of the pellets at the plasma would exceed the lifetime of the plasma, 5.4 ms. Consequently the injector was to trigger ETA-BETA II by an output from the pellet timer.

The two available pellet sizes, 0.38 mm and 0.70 mm diameter, were insufficient, as they were proven to be too small. A new pellet size with a diameter of 1.5 mm and an length of 3.0 mm was made available. These changes of pellet dimensions show how difficult any prediction of pellet specifications or dimensions regarding pellet injectors are.

The pipe gun.

Claudet and his colleagues in Grenoble, France suggested another method of forming the pellets. According to this method the pellet might be formed "in situ" in the gunbarrel, and then fired by a fast valve, a principle known from other pneumatic injectors.

The American and French designs are based on Claudet's design. The freezing cell, in which the pellet is formed, is cooled by means of a liquid helium flow cryostat. The two gunbarrels, rear and front, are connected to the freezing cell by flanges. Thermal insulation between the barrels and freezing cell was obtained by inserting polyimid washers (insulation material). Heaters placed on the barrels outside the flanges established the temperature gradients across the washers, ensuring that pellets were only formed inside the freezing cell.

A further simplified "pipe-gun" has been constructed at Risø National Laboratory.

Figure 2: Schematic display of simplified "pipe-gun".

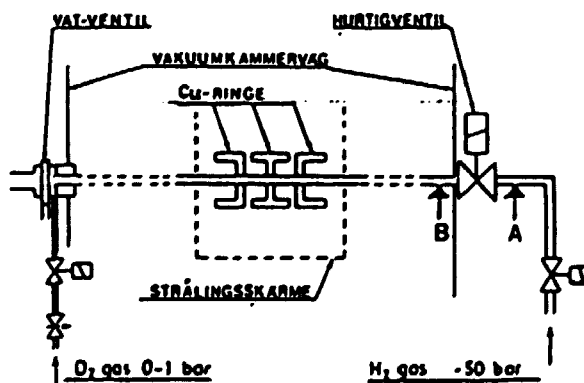


Figure 2

The "pipe-gun" was made from a continuous tube of stainless steel or brass. Three (or more) circular rings of annealed electrolytic copper were soldered to the barrel. The rings were connected thermally to the liquid helium bath cryostat with wires of annealed copper. Each ring was supplied with a heater.

It is noteworthy that Risø uses bath cryostat whereas the French and the Americans use flow cryostat.

Thermal couplings of the rings were chosen in order to obtain a relatively higher temperature of the outer rings, thus ensuring intersegmental gradients. The gradients and consequently the point in the gunbarrel where the temperature is given by the condensation temperature could be varied by means of the outer heaters. This facilitates maximum control of the length of the pellet as the deuterium cannot condense at a temperature exceeding 18.7 K (triple point temperature).

The pellet is formed in the following way. Initially the gas condenses at the center ring where the surface temperature of the gunbarrel is lowest, the cryopumping effect thus more efficient. Condensation continues on the surface out through the gunbarrel and on previously condensed gas at the center ring. Condensation on the gunbarrel will continue to the point where the temperature corresponds to the feed gas pressure read on the vapour pressure curve. From this point condensation will occur only on already condensed gas.

Two types of the simplified "pige-gun were constructed, one for large, slow pellets, 100-300 barcm³, and one for small, fast pellets, 9-12.5 barcm³.

Large pellets.

The pellets were formed by inlet of gas from both ends of the gunbarrel through the VAT valve and a small tube placed between the safety valve and the fast valve, point A, Figure 2. The fast valve was the commercial type, Skinner.

The inner diameters of the gunbarrels were 4.5 mm and 5.0 mm respectively; the thickness of the wall was 0.5 mm but between the rings it was reduced to 0.25 mm. The rings were made of annealed electrolytic copper or of annealed copper and brass. Pellets with a length of from 8-20 mm were made at a pressure between 500-1000 mbar. A 10-20 seconds' preheating of the gunbarrel immediately preceding the firing was necessary in order to loosen the pellet from the surface of the gunbarrel. The preheating caused an evaporation of approximately 30% of the pellet, whereas puls-heating only reduced the pellets by 2%, as the heat created by the latter method only penetrates the surface of the pellet. Velocities between 60-200 m/s were achieved by fast valve firing, the propellant gas pressure being 150-2000 mbar. The delay, that is the time be-

tween the firing of the fast valve and the loosening of the pellet from the gunbarrel, was measured to 6-8 ms.

Self firing of the pellets was also registered. When the pellet is heated the outer layer will evaporate. The evaporated pellet material will be heated when it moves outwards through the gunbarrel and will hereby expand and shoot out the pellet before the fast valve has been fired. Self firing during pulse-heating was seen when the heating time exceeded 0.5 seconds. Velocities of 30 m/s and 150 m/s were achieved by self firing for cold- and warm formed pellets.

Pellets formed at temperatures between 8-9 K were of superior quality. Pellets formed at a lower temperature were brittle and pellets formed at a higher temperature had a variegated surface. The temperature at which the pellets are formed depends on the feed pressure and heater input at the center ring.

Small pellets.

The "pipe-gun" for small and fast pellets, 900-1200 m/s, was made from a stainless steel tube, 2 mm inner diameter, and wall thickness 0.3 mm. The three rings had a width of 2 mm and the distance between them was 7 mm. Stainless steel was chosen because of its lower heat conductivity, and thereby larger temperature gradients.

Gas was also fed from both ends of the gunbarrel, through the VAI valve and a small tube soldered on to the gunbarrel, point B, Figure 2. The diameter of the tube should be much smaller than that of the barrel in order to reduce the disturbance of the propeller gas pressure burst, and the valve on the tube must have the capacity to close for two flow directions, one of them even a high pressure.

The quality of the pellet depends on the (vapor-) feed gas pressure. At a high feed gas pressure the pellet will extend well beyond the center ring, and the pellet will be formed at varying temperatures, thus becoming inhomogenous. This effect is less pronounced for lower feed gas pressure.

It may thus be concluded that the pellets are most conveniently formed at a lower feed gas pressure, as this method entails a less pronounced extension of the pellet outside the center ring and accordingly a more homogenous pellet.

The following results were obtained:

$$\begin{array}{ll} P_{\text{feed}}: 200-500 \text{ mbar} & P_{\text{prop}}: 30-50 \text{ bar} \\ L_{\text{pellet}}: 2-4 \text{ mm} & V_{\text{pellet}}: 900-1200 \text{ m/s.} \end{array}$$

A "one-sided" production of pellets was also made, gas being fed to the "pipe-gun" only through the VAI valve. A simplification of the "pipe-gun" was rendered possible as some of the valves and the small, thin tube might be removed.

At a feed gas pressure of	30-40 mbar
and a propeller gas pressure of:	30 bar
velocities of	900 m/s

were achieved.

However, the quality of the pellets was such that they could not withstand a higher propeller gas pressure. At a lower feed gas pressure, 20-10-4 mbar, and strong temperature gradients, pellets of good quality were formed.

The total heating effect from the electrical heater on the center ring and the feed gas pressure should be such that the pellet is formed at a temperature around 280-300 ohm.

Because the "one-sided" production of pellets results in a simplification of the construction of the injector, this simplification will result in a cheaper injector.

INDLEDNING

Følgende rapport omhandler Brintpilleinjektorer, apparater med hvilke man injicerer piller af fast- brint og deuterium i eksisterende fusionsreaktorer. Injektorer er f.eks. blevet udviklet og opbygget i Risø plasmafysiksektion.

I forbindelse med en stigende interesse for pilleinjektion og en heraf eventuel stigende ordretilgang blev det besluttet, at forsøge at skabe en interesse i dansk industri for disse injektorer med det for øje, at industrien skulle markedsføre og senere stå for en produktion af brintpilleinjektorer. Holdningen var endvidere et krav fra Energiministeriets side, hvis sektionens videre arbejde indenfor dette område skulle støttes økonomisk.

Den stigende interesse for pilleinjektion grunder i to forhold, dels kan pillerne bruges som diagnostisk værktøj, dels er det en måde og sandsynligvis den eneste måde, hvorpå nyt brændstof kan blive tilført reaktoren.

I den forbindelse blev en erhvervsforskeruddannelse etableret, hvor kandidaten (undertegnede) skulle overføre viden mellem institutionen og virksomheden.

I uddannelsesperioden har jeg deltaget i færdiggørelsen af en ekstrusionsinjektor, der skulle leveres til det italienske institut, Istituto Gas Ionizzato i Padova. Injektoren blev installeret i sommeren 1986. Det første uddannelsesår var helliget dette projekt. Det sidste år har været helliget udvikling, opbygning og forståelse af en ny type injektor, den såkaldte "pipe-gun".

Rapporten er disponeret på følgende måde:

Efter sammenfatningen på dansk og engelsk følger kapitel 1, der giver en generel og kortfattet introduktion til henholdsvis fusion/pilleinjektion (afsnit 1) og pilleinjektorens dimensionering (repetitionsrate, pillehastighed, pillestørrelse osv.) afhængig af maskinens specifikationer (plasmatemperatur, -tæthed, udstrækning osv; afsnit 2 munder ud i en angivelse af, hvilke specifikationer der (bør) tages højde for ved injektorens opbygning.

Kapitel 2 beskriver injektorens historiske udvikling i korte træk gennem de sidste 12-13 år, hvilke typer der har været gennem tiderne, og hvilke resultater, der er opnået med disse.

Kapitel 3 og 4 bør ses som et hele. I kapitel 3 bliver der gjort opmærksom på, hvad der ligger i begrebet en pilleinjektor, at den ikke kun består af den kryogene del, men af flere separate dele. En generel beskrivelse af de enkelte dele finder sted i afsnit 1. I afsnit 2 bliver 3 injektortyper sammenlignet, der er eller har været opstillet ved 3 forskellige maskiner. Der bliver

argumenteret for, at hver enkelt injektor må konstrueres specielt til hver maskine. Kapitel 3 afsnit 2 bør sammenholdes med kapitel 1 afsnit 2.

Kapitel 4, der omhandler Padova-injektoren, beskriver i detaljer, hvordan de enkelte dele, som injektoren består af, var opbygget.

I kapitel 5 og 6 bliver den nye injektortype, "pipe-gun"en, beskrevet. Kapitel 5 beskriver vores første erfaringer med denne injektortype. Injektoren skulle danne store, langsomme piller, $100-350 \text{ barcm}^3$ og $30-200 \text{ m/s}$. Resultater og erfaringer bliver præsenteret. Kapitel 6 beskriver opbygning og resultater opnået med en "pipe-gun", der var beregnet til små, hurtige piller, $9-12 \text{ barcm}^3$ og $900-1200 \text{ m/s}$. Yderligere erfaringer med/forståelse af "pipe-gun"en præsenteres.

En kort diskussion præsenteres til sidst.

KAPITEL 1

1.1 Introduktion til fusion og pilleinjektion.

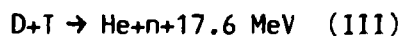
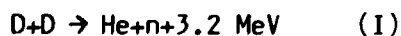
Med et krav om en generelt højere levestandard i verden må et stadigt voksende energiforbrug blive konsekvensen.

Menneskehedens energiforbrug bliver i dag primært dækket af de "klassiske" energikilder: olie, gas, kul og vandkraft. Disse energikilder vil blive udtømt på et tidspunkt, om 1-2-3 hundrede år (på nær vandkraften).

Med det for øje begyndte man at se sig om efter "alternative" energikilder. Energikilderne, der kan opfattes som "alternative" energikilder, er: solenergi, vindenergi, atomkraftenergi og fusionsenergi. Indenfor alle 4 energiformer har der fundet, og finder der stadig, en omfattende forskning sted. Forskningen indenfor sol-, vind- og atomkraftenergi har resulteret i en mere eller mindre effektiv udnyttelse af disse energikilder. De to af energikilderne, sol- og vindenergi, kan man på indeværende tidspunkt svært forestille sig spille rollen som de alt overvejende energikilder. Energi udvundet ved atomkraft, kernespløtning, vil være begrænset dels af uranmalmens begrænsede forekomst, dels af det tilhørende radioaktive affald (deponeringsproblemer).

Den tiloversblevne energikilde, fusionsenergien, er nok den energikilde, menneskeheden bør se som en udvej/løsning på dens fremtidige energiproblemer. Brændselet er brint og dets isotoper, deuterium og tritium. Brint og deuterium forekommer i ganske almindeligt havvand, hvilket betyder, at energikilden nærmest er udtømmelig.

Ved fusionsprocesser smelter lette kerner sammen og danner herved tungere kerner. Fusionsprocesser foregår f.eks. i solens indre. Der foregår flere kerneprocesser samtidigt, og af disse kan nævnes:



Processen af interesse med henblik på en kommerciel udnyttelse af fusionsenergien er den, der dels kræver lavest energi for at forløbe, dels giver størst energiudbytte. Proces nr. (III) er processen af interesse, da den "kun" kræver 100 millioner grader for at forløbe, og energiudbyttet pr. proces er 17.6 MeV.

De høje temperaturer forsøges opnået i specielle testreaktorer (tokamak, RFP

osv.). Selve plasmaet, fuldt ioniseret gas, befinder sig i torussen (cylinder, der bider sig selv i enden). For brints vedkommende sker ioniseringen allerede ved 10.000°C . På grund af de høje temperaturer skal plasmaet afskærmes fra torussens væg. Dette bliver opnået ved at gøre brug af meget stærke magnetfelter, der holder på den ioniserede "suppe".

Ved opvarmning af plasmaet benyttes i dag følgende metoder: elektromagnetisk opvarmning, neutral beam injektion og adiabatisk kontraktion af plasmaet.

En betingelse for, at fremtidige fusionsreaktorer skal kunne give udbytte, er:

$$T \approx 100 \text{ mill. grader}$$
$$n \cdot \tau \geq 2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3} \text{ s}$$

hvor n er plasmatætheden, og τ er plasmaindeslutningstiden. På indeværende tidspunkt har det ikke været muligt at optimere begge betingelser samtidigt. Men man har været i stand til at opnå hver af betingelserne på bekostning af den anden.

I kommende fusionsreaktorer vil man være tvunget til at tilføre/injicere frisk brændstof til plasmaet, da denne injektion skal kompensere for det tab af partikler, der dels opstår ved fusionsprocesserne, dels ved diffusion af plasmapartiklerne ud til væggen omkring plasmaet. De to først foreslåede metoder var "cold-blanket"-metoden og injektion af neutrale partikler.

Ved "cold plasma blanket"-metoden danner man et tæppe af et "koldt" plasma langs indervæggen af maskinen ved at tilføre gas langs væggen. Partiklerne diffunderer herefter ind i plasmaet og bidrager herved til plasmatætheden og fusionsprocesserne. Den anden metode taler for sig selv, og viste sig at være økonomisk ufordelagtig.

I dag anses ingen af metoderne for anvendelige i fremtidige fusionsreaktorer.

Den økonomiske ufordelagtighed ved metode to blev overvundet ved at sende partiklerne ind samlet i en pille vha. en pilleinjektor istedet for enkeltvist. Herved anvendes der mindre energi pr. injiceret partikel.

Teoretiske beregninger og eksperimentelle forsøg har vist, at en pille, der injiceres i plasmaet, danner en beskyttende (kølig) sfære af fordampet egenmateriale rundt omkring sig selv. Den beskyttende (kølige) sfære bevirker, at pillen har mulighed for at trænge dybere ind i plasmaet, inden den fordamper. Fordampningsmængden/-takten kan måles ved den såkaldte $H\alpha$ -stråling. $H\alpha$ -stråling opstår, når fordampet pillemateriale, der er neutralt ladet, bliver ioni-

seret ved vekselvirkning med plasmaets partikler.

Den første gang pilleinjektion blev foreslået var i 1954, og den første pilleinjektion fandt sted i 1975.

Pilleinjektorens accelerationsprincip har udviklet sig fra det relativt "primitive" mekaniske accelerationsprincip og frem til mere eksotiske og sofistikerede accelerationsprincipper. En mere detaljeret gennemgang af brintpilleinjektorens udvikling og resultater finder sted i kapitel 2.

Fusionsforskningen foregår i dag globalt. I Vesteuropa er man gået sammen i et europæisk samarbejde under navnet Euratom. Samarbejdet har udmøntet sig i opbygningen af en maskine kaldet JET (Joint European Iorus) med hjemsted i Culham i England. Næsten alle lande i Vesteuropa deltager i dette samarbejde. I U.S.A. arbejder man i adskillige laboratorier som f.eks. ORNL (Oak Ridge National Laboratory) og Los Alamos. U.S.A.'s største maskine hedder TFTR (Tokamak Iest Fusion Reactor). Ligeså arbejder russerne og japanerne egenhændigt. Japanernes største maskine hedder JT-60.

I det europæiske samarbejde planlægger man en ny maskine kaldet NET (Next European Iorus). Maskinen, NET, skal overtage JET's plads, når den har overstået sin sidste fase: injektion af radioaktive tritiumpiller. Er der først injiceret tritiumpiller i maskinen, er reparationer inde i maskinen udelukket p.g.a. radioaktiviteten.

Brintpilleinjektorens dimensionering ud fra maskinen er et uundgåeligt og interessant problem. Denne problematik vil der blive taget hul på i det efterfølgende afsnit.

1.2 Pilleinjektorens dimensionering afhængig af maskinen.

Som det vil fremgå ved en gennemgang af bogen over igangværende aktiviteter indenfor fusionsforskningen udsendt af IAEA (International Atom ic Energy Agency), foregår der en omfattende forskning indenfor området.

Som det også fremgår af bogen, eksisterer der et stort antal maskiner rundt om i verden. Der findes forskellige slags maskiner: Tokamak, RFP, Stellarator, osv. Hver maskintype har sine karakteristika. De mest anvendte maskiner er Tokamak'en og RFP'en (samt Stellaratoren).

En af de væsentligste forskelle mellem en Tokamak og en RFP er plasmaets temperatur. På grund af det høje torodialfelt (løber parallelt med torus), omkring hvilket elektronerne/ionerne bevæger sig i cirkulære, fremadskridende baner, har Tokamakken lettere ved at holde på partiklerne, hvorved plasmaet har en større stabilitet og en heraf højere temperatur. RFP'ens plasma har en væsentligt lavere temperatur på grund af dens mindre torodialfelt og en heraf større plasmainstabilitet. Så allerede på dette punkt, plasmatemperaturen, adskiller disse to maskintyper sig fra hinanden.

Endvidere fremgår det også af bogen, at maskiner indenfor samme maskintype kan have vidt forskellige tekniske specifikationer (fysiske parametre). Et udsnit af maskinens mest interessante fysiske parametre er: plasmatemperatur, -tæthed, -udstrækning, -levetid ("energy confinement time") og -volumen.

Som man kan tænke sig, kan disse parametre kombineres på et stort antal måder. Det store antal af kombinationsmuligheder vil naturligvis "smitte af" på antallet af måder, hvorpå injektoren kan designes/konstrueres.

Altså vil injektorens udformning/tekniske specifikationer være bestemt af maskinens tekniske specifikationer/fysiske parametre,
eller sagt på en anden måde:

enhver injektor skal skræddersyes til den enkelte maskine.

For en nærmere uddybning af dette henvises der til kapitel 3, afsnit 2, hvor der foretages en sammenligning mellem 3 injektorer opstillet ved hver deres maskine, og hvor maskinernes tekniske specifikationer (tildels) er forskellige.

Specifikationer på injektoren, der har interesse med henblik på pilleinjektion, er: pillehastigheden, pillestørrelsen og repetitionsraten (injiceret

pille pr. tidsenhed..

Da man må gå ud fra, at fremtidige fusionsreaktorer vil have en stor plasmaudstrækning, vil et afgørende krav være:

at pillehastigheden bør være stor, for at pillen skal have en chance for at overleve transporten i det varme plasma og hermed nå plasmaets centrum.

Kravet, at pillen skal nå plasmaets centrum, er afgørende, da antallet af term nukleare processer, pillen vil bidrage med, vil være størst i og nær plasmaets centrum (plasmaet er varmest der).

Pillestørrelsen vil også spille en afgørende rolle. Pillestørrelsen kan ikke vælges vilkårligt, da den afhænger af nogle af maskinens parametre. Vælger man en for lille pille i forhold til maskinens plasmatæthed, vil partikelforøgelsen ikke, eller kun i ringe grad kunne detekteres. En for stor pille vil til gengæld kunne ødelægge målingen (indirekte). En anden af maskinens parametre er plasmatemperaturen, da jo varmere plasmaet er, jo større bør pillen være, da der vil fordampe mere af pillen.

Et yderligere krav er derfor, at pillestørrelsen skal dimensioneres meget nøjagtigt efter maskinens specifikationer (plasmataethed og plasmatemperatur), ellers vil pilleinjektionen være forgæves.

Et yderligere krav, for at fremtidige fusionsreaktorer skal kunne give et udbytte er, at punktet "break-even" nåes og overskrides. Ved "break-even" skal forstås, at energien, der bliver puttet ind i maskinen, er lig den energi, man får ud af maskinen. For at dette skal kunne lade sig gøre, skal antallet af term nukleare processer, der finder sted indenfor plasmaets levetid, forøges betragteligt. Dette kan opnås, ved at der kontinuert bliver injiceret et større antal piller ind i plasmaet indenfor plasmaets levetid; pillerepetitionsraten skal derfor sættes betragteligt op.

En høj pillerepetitionsrate er altså også et afgørende krav.

Hvor høj repetitionsraten bør være, er der blevet regnet meget på, man mener en repetitionsrate på 1 pille/ 10^{-4} s er realistisk.

Som det er fremgået af ovennævnte, er pilleinjektorens udformning helt og

holdent bestemt af maskinens specifikationer.

Til udtalelsen anført tidligere i afsnittet:

hver pilleinjektor er skræddersyet til sit formål,

bør der knyttes nogle bemærkninger.

Som det blev indirekte fremhævet tidligere, kan maskiner indenfor samme maskintype have samme tekniske specifikationer. Dette er naturligvis ensbetydende med, at en injektor fremstillet til f.eks. en bestemt RFP med stor sandsynlighed kan anvendes ved en anden RFP, efter at man har foretaget enkelte modifikationer. Samkøringsproblematikken er dog for det meste et individuelt maskinproblem.

Dette giver et indtryk af en vis form for fleksibilitet vedrørende det at anvende en injektor indenfor samme maskintype. Ovennævnte udsagn bør derfor modificeres til:

hver pilleinjektor er skræddersyet til den enkelte maskine med en indbygget fleksibilitet med hensyn til at anvende injektoren ved forskellige maskiner indenfor samme maskintype.

KAPITEL 2

Oversigt over pilleinjektorens udvikling.

Som det blev nævnt i kapitel 1, afsnit 2, er det et alt afgørende krav med en høj pillehastighed, hvis pillen skal have mulighed for at nå plasmaets centrum. Foruden kravet om den høje pillehastighed er det et yderligere krav, at repetitionsraten også skal være høj.

I det efterfølgende vil pilleinjektorens udvikling og resultater, pillehastighed og repetitionsrate blive præsenteret i summarisk form.

Første gang ideen om brændstofftilførsel med piller blev fremsat var i 1954 af Spitzer og hans medarbejdere (SP54), hvor de foreslog at injicere faste piller eller flydende dråber af hydrogen og dets isotoper med høj hastighed i plasmaet.

Der gik næsten 20 år, før det første pilleinjektionseksperiment blev udført. Eksperimentet foregik i en Puffatron (JØ75) ved Risø i Danmark.

Pilleinjektoren var af den mekaniske accelerationstype. Injektoren udtog en pille af et ekstruderet filament ved hjælp af en "nål" placeret på et stemmel af rustfrit stål. Pillen blev accelereret af "nålen" ved udtagningen. Typen blev første gang beskrevet i 1967 af Francis (FR67) og senere i en modificeret udgave i 1969 af Taylor (TA69). Dimensionerne af pillerne var $0.25 \times 0.25 \text{ mm}^2$ (cylinderformet), og hastighederne var ca. 10 m/s.

Senere blev der fremstillet en injektor, hvor det frie fald i tyngdefeltet blev anvendt som accelerationsmekanisme.

Injektoren benyttede sig af 2 "termiske knive" (tungsten heatere), der skar gennem det ekstruderede materiale (JA74), hvorved den ønskede pille blev udtacet, og accelereret i tyngdefeltet. Injektoren var i stand til at fremstille piller med en diameter på 0.35-0.40 mm (cylinder) med varierende længde.

Hastigheden var mindre end 10 m/s.

Skridtet videre med henblik på brændstofftilførsel til fremtidige fusionsreaktorer blev taget ved eksperimenter udført ved ORMAK-Tokamakken i årene 1975-76 ved Oak Ridge National Laboratory (ORNL) med en liquid droplet generator (FO77). Injektoren producerede hydrogenpiller som en vedvarende strøm ved en proces, der benyttede sig af akustisk desintegration af en lavhastighed laminar strøm af elastisk flydende brint. På grund af eventuel opålsning af

turbulens var operationsområdet begrænset til lave hastigheder og små pille-dimensioner. Pillerne faldt i vakuum, hvor trykket var under brints triple-punkttryk (ca. 54 torr) for herved at danne en tynd beskyttende hinde af fast hydrogen omkring den plastiske indre del. Herefter fortsatte pillerne gennem et smalt rør ned i et UHV-kammer. Anordningen gav en gas-dynamisk acceleration af pillerne. Pillerne var sfæriske med dimensioner på henholdsvis 0.07 mm og 0.21 mm i diameter, og hastighederne var 100 m/s.

De 3 nævnte injektortyper vil aldrig komme til at opfylde de hastigheds-krav, som kommende (test-) fusionsreaktorer stiller/vil stille. Hastighederne ligger en faktor 100-1000 under det ønskelige.

Skinnebøssen.

En injektortype, der opfyldte hastighedsbetingelsen, blev konstrueret af Rashleigh og Marshall i 1978 (RA78). Injektoren kunne accelerere piller (af kunststof) op til hastigheder på 5.9 km/s. Injektoren var af "railgun" (skinnebøsse) -typen. Maskinen bestod af 2 skinner, imellem hvilken en "arc" (bue) var placeret som kobling. Mellem skinnerne blev der af strømmen, der løb i skinnerne, genereret en magnetisk fluxtæthed B , der vekselvirkede med strømtætheden gennem "arc"en. Vekselvirkningen mellem B -feltet og strømtætheden resulterer i en Lorentzkraft, der påvirkede "arc"en og hermed også pillen, der var placeret på den ene side af "arc"en. Pillen blev affyret ved hjælp af Lorentzkraften.

Senere i 1983 blev der opnået hastigheder på 10 km/s med denne injektortype (HA83). Typen har endnu ikke været brugt på brint/deuteriumpiller.

For samtidig med det høje hastighedskrav også at kunne opfylde den høje repetitionsrate (≈ 1 pille/ 10^{-4} sekund), blev der udviklet nye typer af injektorer.

Centrifugalkraftinjektoren.

En af typerne benyttede sig af centrifugalkraftprincippet. Typen blev eksempelvis først fremstillet ved ORNL af Foster i 1978 (F078) og ved Max Planck Institut für Plasmaphysik (Årsrapport 1978). ORNL-injektoren havde en direkte fødemekanisme af piller ind i injektionsenheden. Injektoren bestod af en ekstrusionsdel, der kontinuert ekstruderede filament ud gennem en dyse med en hastighed på 15 cm/s. Nede under ekstrusionsenheden roterede injektionsenheden,

en cirkulær plade (30 cm i diameter), med en frekvens på 150 Hz. På pladen var der placeret 2 U-formede accelerationsrør, hvis inderste ende lige nøjagtig skar igennem det ekstruderede filament givende piller på ≈ 1 mm's længde (cylinder). Herefter blev pillerne accelereret ud igennem røret. Pillerne havde en hastighed på 290 m/s.

I 1983 videreudviklede Foster centrifugalkraftinjektoren fra 1978 (F083). En ny forbedret ekstrusionsenhed var blevet udviklet, og den direkte fødemekanisme fra 1978 (F078) blev ændret til en indirekte fødemekanisme (F083). Rotoren havde en diameter på 1 meter. Der blev nu ekstruderet 5 cm deuterium pr. sekund med en pilledimension på 1.3 mm i længde og diameter (cylinder) svarede dette til ca. 40 piller pr. sekund. Hastighederne af pillerne lå på omkring 1000 m/s. Pillerne blev udtaget af deuteriumfilamentet og faldt herefter ned på rotoren, hvor der var placeret en ledevej, der transporterede pillerne fra et punkt nær midten ud til periferien, hvorfra injektionen foregik.

I 1982 konstruerede Amenda og Lang (AM82) en ekstrusionsmekanisme, der kunne ekstrudere op til 3.5 m deuterium pr. sekund. Injektionsrotoren var af samme design som den ved ORNL (F078). Pillehastigheder større end 500 m/s blev opnået.

I 1986 rapporterede Amenda og Lang hastigheder på op til 720 m/s (AM86). Repetitionsraten var 50 piller pr. sekund. Fødemekanismen var af den direkte type. Deuteriumpillerne var 1.2 mm lange og 1 mm i diameter, og ekstrusionsdelen var den samme, som der var blevet udviklet i 1982 (AM82). Rotoren var en cirkulær disk med en diameter på 0.25 m. Spredningen, med hvilken pillen forlod rotoren, var $\pm 1.4^\circ$.

Den pneumatiske injektor.

En anden type af injektorer blev baseret på det pneumatiske princip.

Typen har flere umiddelbare fordele fremfor centrifugalkraftinjektoren. For det første er centrifugalkraftinjektoren "en stor mekanisk maskine", der roterer med en høj frekvens. Dette betyder, at dels skal standarden af de mekaniske dele, der udgør rotoren, være høj, (f.eks. bør den være velafbalanceret), dels er injektortypen pladskrævende p.g.a. dens fysiske udstrækning og den fornødne sikkerhedszone. For det andet vil spredningen, hvormed pillen forlader rotoren, være et stort problem, da pillen skal forlade rotoren meget præcist, hvis den skal have mulighed for at fortsætte ind i et snævert lederør og videre ind i plasmaet.

Disse ting anskueliggør nogle af de ulemper, der er forbundet ved injektion af piller med centrifugalkraftinjektoren.

Den pneumatiske pilleinjektor benytter sig af komprimeret gas til at accelerere pillerne med; der kræves kun et reservoir og/eller en højtrykflaske, man undgår helt de store mekaniske dele.

En ulempe ved den pneumatiske pilleinjektor er mængden af affyringsgas. Ved affyringen slipper der meget gas med ud, imens ventilen er åben. Denne gas fjernes ved brug af differentialpumpekamre.

Injektorer af denne type blev i starten fremstillet ved ORNL (F078), Garching (78) og Risø (N080/årsrapport 78). Injektoren fra ORNL blev brugt ved henholdsvis ISX-A (MI79(A)) og ISX-B (MI79(B)), der var en opfølging af eksperimenterne ved ORMAK (F077). Pillernes dimensioner var henholdsvis 0.6 i diameter x 0.6 mm (cylinder) og 1.1 i diameter x 1.1 mm (cylinder), og de tilsvarende hastigheder var henholdsvis ≈ 350 m/s og ≈ 1000 m/s. Det var den samme injektor ved begge eksperimenter; ved ISX-B-eksperimentet var den blevet modificeret for at opnå højere hastigheder. Den centrale del af injektoren bestod af en 1 mm tyk rundskive (pilletransportøren), der var i stand til at rotere 180° ; den var placeret inde i et kobberhus, der var kølet ned til flydende heliums temperatur. Hydrogenkassen, der blev ledt ind i kobberhuset, kondenserede "in-situ" og udfyldte herved et hul med en diameter på 1 mm i transportøren. Skiven blev roteret 180° op til børseløbet, hvorefter pillen kunne skydes ud. Hastighederne var ≈ 1000 m/s i et 16 cm langt børseløb.

Ved Garching- og Risø-injektoren blev pillen dannet ved først at ekstrudere deuteriummet og derefter udtage en pille af filamentet. Dette blev for Risøs vedkommende gjort ved at føre børseløbet ind igennem deuteriumfilamentet. Risø-injektoren var af typen Light gas gun: kondenseret brintgas blev pulsopvarmet, hvorved det ekspanderer, og skyder pillen ud.

Injektoren, der var udviklet ved Risø, blev brugt til at injicere piller af størrelsesordenen 0.13 mg i den danske Tokamak DANTE (AN80). Injektoren er beskrevet af Nordskov (N080). Pillehastigheden var 150-200 m/s.

En ny metode, lederørsmetoden, til transport af piller fra injektoren til eksperimentet blev første gang foreslået og efterprøvet ved Risø (JE81/AN80). Princippet er, at pillen transporteres gennem et lederør (plastik) over til maskinen, den glider på rørets glatte inderside på en tynd film af fordampet egenmateriale uden nævneværdigt tab af materiale. Systemet havde den force, at man fik 1) en bedre adskillelse af de 2 vakuumssystemer, 2) større valgfri-

hed med hensyn til placering af injektoren i forhold til maskinen, 3) mulighed for, at flere injektorer kunne placeres ved samme indgang til maskinen og 4) en elektrisk adskillelse af injektor og maskine.

Injektoren, der var udviklet ved Risø, blev modificeret til brug ved den franske TRF-tokamak. Man skiftede "pulsopvarmning"s accelerationsprincippet ud med en hurtigventil samtidig med, at man satte et længere bøsseløb i. Dette gav højere hastigheder, ≈ 700 m/s (S082).

I 1983 modificerede Schuresko og medarbejdere pilleinjektoren, der blev brugt ved ISX-eksperimenterne (SC83). De opnåede hastigheder på 1.4 km/s med affyringstryk op til 50 bar. Pilledimensionen var 0.3 mm i diameter, og bøsseløbet var 100 cm langt. De undersøgte den pneumatiske injektors gasdynamik. De sammenlignede deres resultater med beregninger, der tog højde for propel- lergassens vekselvirken med bøsseløbets overflade, varmetransport, tidsaf- hængige randbetingelser osv.

I 1984 rapporterede Risø hastigheder større end 1300 m/s for deuteriumpil- ler og hastigheder større end 1400 m/s for brintpiller (S084). Resultaterne blev opnået ved den pneumatiske ekstrusionsinjektortype.

Den pneumatiske pilleinjektor karakteriseres ved piller med en masse på 0.01-1 mg og hastigheder op til 1500 m/s.

"Arc-heated gun".

En injektor beregnet til piller med en masse større en 5 mg og hastigheder større end 2 km/s blev udviklet ved Risø i 1984 (AN 84). Injektoren havde til- navnet "arc (bue)-heated gun". Udladningskammeret var kølet ned til under brints kondensationstemperatur. Den kondenserede brint bringes til at fordampe, ved at der foretages en udladning i kammeret via en kuleelektrode, der var plæ- ceret midt i udladningskammeret, der var i kontakt med en kapacitorbank. Ud- ladningen varmer den faste brint op, og denne ekspanderer herefter ud gennem bøsseløbet, og affyrer herved pillen. Man opnåede hastigheder på 1850 m/s med piller af størrelsen 2.5 mg.

Flerskudsinjektorer.

I 1982 præsenterede Combs og hans medarbejdere en flerskudsinjektor baseret på ekstrusionsprincippet (C082). Ekstrusionen foregik på samme måde som be- skrevet af Foster i 1978 ved centrifugalkraftinjektoren (F078). Pillerepeti-

tionsraten var på 10-20 piller/sekund. Hastigheder på 1000 m/s blev opnået.

Operationsprincippet (transportøren), der blev anvendt ved enkeltskudsinjektoren, der var opstillet ved ISX-A(-B) eksperimenterne (MI 79(A/B)), blev senere anvendt ved 4-skudsinjektoren udviklet ved ORNL (C083). Injektoren bestod af 4 uafhængige bøsselebe med tilhørende hurtigventiler. Pillerne var 1 mm diameter, og hastigheder på 500-700 m/s med helium som affyringsgas (18 bar) blev opnået. 4-skudsinjektoren har været opstillet ved ISX-B og Alcator -C (GR 84).

I 1985 opnåede Combs og hans medarbejdere (C085) hastigheder på mindre end eller lig 1.9 km/s for en flerskudsinjektor med samme ekstrusionsdel som beskrevet af Foster i 1983 (F083). Lademekanismen var som beskrevet af Combs i 1982 (C082). 1.9 km/s for brint og 1.6 km/s for deuterium blev målt ved et affyringstryk på 125 bar. Pilledimensionerne var 2.7 og 4.0 mm diameter. En repetitionsrate på 6 piller/sekund for den store pille blev opnået. Målingerne blev sammenlignet med "den ideelle teori". En bøsselebelængde på 80 cm blev fundet mest ideel.

Injektoren fremstillet i 1985 (C085) blev installeret ved TFTR (C086). Hastigheder mellem 1.0 og 1.5 km/s (deuteriumpiller) blev målt. Bøsselebelængde var 80 cm langt. 5 piller med en diameter på 2.7 mm blev injiceret med 0.25 sekunders mellemrum i TFTR, hvorved plasmatætheden steg kontinuert op til $1.4 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$. Enkel injektion af den store pille, 4.0 mm i diameter, blev også foretaget, hvilket gav en plasmatæthed på $1.8 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$.

Ekstrusionsinjektorerne, der har været omtalt indtil nu, kræver en mekanisk håndtering af pillen i den kryogene del af injektoren.

"Pipe-gun".

En ny injektortype blev første gang foreslået og bygget af Claudet og hans medarbejdere i Grenoble i Frankrig. Injektoren fik tilnavnet "pipe-gun". Ved denne metode bliver en pille dannet ved "in-situ" kondensation i bøsselebet, og bliver herefter skudt ud ved hjælp af en hurtigventil på samme måde som ved andre pneumatiske pilleinjektorer.

Frysecellen, hvor pillen dannes, er koblet til de to bøsselebedele (fortil og bagtil) ved hjælp af flanger. Isolationen mellem frysecellen og bøsselebene blev etableret ved brug af spændringe lavet af polyimid.

Typen (enkeltskuds) blev første gang brugt til injektion af piller i TFTR (LA85).

En enkeltskuds "pipe-gun" blev senere konstrueret og bygget af Combs og hans medarbejdere (C086). "Pipe-gun"en kunne affyre piller med hastigheder op til 1680 m/s (brint) ved et affyringstryk på 130 bar. Pilledimensionen var ≈ 4 mm i diameter og 8 mm i længde svarende til en pillemasse på 18 mg. Fødetrykket var mindre end 1 bar. Bøsseløbets længde var 85 cm.

Franskmændene fremstillede sammen med JET en enkeltskuds "pipe-gun" beregnet til piller med en diameter på 6 mm (LA86). Pillens længde kunne variere fra 8-18 mm afhængig af fødetryk og heaterstrøm. Bøsseløbets længde var 50 cm, og propellergastrykket var maksimalt 100 bar. Hastigheder på 1390 m/s blev opnået. Meningen med injektoren var, 1) at undersøge, om man kunne variere pillens længde ved en "in situ" kondensation, samt 2) at undersøge om pillen kunne overleve en acceleration på 10^7 m/s^2 , eller derover.

Ved Risø plasmafysiksektion er der blevet opbygget en mere simpel "pipe-gun", hvor "pipe-gun"en bestod af et ubrudt rør af rustfrit stål eller messing, hvorpå der var placeret et antal cirkulære segmenter af udglødet kobber. Pillerne blev også dannet ved "in-situ" kondensation i bøsseløbet.

Store piller af størrelsesordenen $100\text{--}350 \text{ barcm}^3$ blev dannet, og hastigheder mellem 35-200 m/s blev opnået. Længden af pillerne varierede mellem 10-20 mm. Små piller af størrelsesordenen $9\text{--}13 \text{ barcm}^3$ blev også dannet, og deres tilsvarende hastigheder lå mellem 900-1200 m/s. Længden af de små piller var mellem 3-4 mm.

Ny flerskuds injektor.

En 8-skudsinjektor, der havde en ekstrusionsdel som ved centrifugalkraftinjektoren (F083) og en lademekanisme som ved 4-skudsinjektoren, blev også fremstillet (C086). Injektoren havde 3 forskellige pillestørrelser: 3.0, 3.5 og 4.0 mm i diameter. Pillerne kunne affyres uafhængigt af hinanden. Der var 6 bøsseløb, 3 med hver 3.0 mm og 3.5 mm i diameter og 2 bøsseløb med 4.0 mm i diameter. Pillelængden var ens for alle pillestørrelser, 3.5 mm. Hastigheder for deuteriumpiller på 1500 m/s blev opnået. Injektoren er for tiden opstillet ved IFIR.

Ny centrifugalkraftinjektor.

En ny forbedret centrifugalkraftinjektor er under opbygning som et led i et samarbejdsprojekt mellem ORNL og CEA (Commissariat à l'Énergie Atomique) ved Tore Supra (C086). Pillerne skal være 3.0 mm i diameter (deuterium), og hastig-

heder på mellem 800-1500 m/s forventes. Repetitionsraten forventes at blive 30 piller pr. sekund. Fødemekanismen er af et nyt design kaldet Zamboni. Zambonimaskinen består af en roterende rundskive, der er kølet ned til flydende heliums temperatur, hvorpå deuteriummet kondenseres. Piller af variabel størrelse udtages af den faste deuteriummasse. Den udtagne masse erstattes løbende med nyt fast deuterium.

Ny accelerationsmetoder.

En metode til acceleration af piller til hastigheder langt over 2 km/s er også under opbygning. Ved ORNL er man i færd med at undersøge 2 metoder: (a) elektrisk bue-udladning og (b) en elektronbeam opvarmet raket (C086).

Mekanismen ved den første type er, at mellem hurtigventilen og pillen er der placeret et cylinderformet bue-kammer. I dette kammer foretages der en udladning via en tungsten elektrode, der er i forbindelse med en kondensatorbank. Herved opvarmes den ekspanderende indslusede affyringsgas med det resultat, at affyringstrykket stiger og ligeså lydhastigheden. Piilehastigheder mellem 1.2-1.6 km/s og 1.43-1.85 km/s for henholdsvis deuterium- og brintpiller er opnået. Pilledimensionerne var 4 mm i diameter og 8 mm i længde.

Ved den anden metode forventer man hastigheder mellem 10-20 km/s.

KAPITEL 3

3.1 Hvad består en pilleinjektor af?

I forrige kapitel blev pilleinjektorens udvikling og resultater beskrevet. Ud fra beskrivelsen kunne man måske få den opfattelse, at "injektoren" kun består af den kryogene del og accelerationsdelen. Faktisk kan injektoren deles op i fem dele: den kryogene del inklusive vakuumkammeret, lederørsystemet, differentialpumpekammeret, diagnostikken og den elektroniske styring.

Den kryogene del og vakuumkammeret.

Den kryogene del består af kryostat og injektorenhed. Injektorenheden er den del, hvor pillen dannes og accelereres. Enheden skal være kølet ned til flydende heliums temperatur (-269°C), da brints og deuteriums kondensationstemperaturer begge ligger under 20 K. Injektorenheden er placeret under kryostatens heliumreservoir, og er omgivet af 2 strålingsskærme.

Den anvendte kryostat er en badkryostat. Det er den type Risø plasmafysiksektion bruger. Amerikanerne og franskmændene bruger flow-kryostat.

Den kryogene del er placeret oven på vakuumkammeret.

En måde at transportere pillen over til maskinen på er ved brug af et lederørsystem.

Lederørsystemet.

Lederøret kan blot bestå af et nylonrør med en glat indervæg, hvis indre diameter afhænger af pillens størrelse. Inde i røret vil pillen glide på en tynd film af fordampet egenmateriale uden nævneværdigt tab af pillehastighed og -materiale.

Lederørets anvendelighed begrænses af centrifugalkraftens indvirken på pillen. Der vil til hver hastighed svare en minimal krumningsradius, hvor pillen vil kunne overleve. Pillen vil blive ødelagt under sin transport, hvis dens hastighed overstiger 1200 m/s (5085). Ønsker man pillehastigheder på over 1200 m/s, vil man være tvunget til at benytte retlinet lederør eller en meget stor krumningsradius af lederøret, hvis omstændighederne tillader det.

Anvendelse af lederørsystemet resulterer i følgende fordele 1) at kunne adskille de to vakuumsystemer (kryostat og maskine), 2) at have nogen valgfrihed med hensyn til placering af pilleinjektoren, 3) injektoren og maskinen er elektrisk adskilte, og 4) man kan have flere lederør tilsluttet til den

samme indgangsport.

Foruden det ovennævnte "ydre" lederør mellem injektoren og maskinen, benyttes der også et "indre" lederør, hvis det er ønskværdigt med lav pillehastighed; røret er placeret mellem bøsselføret og ventilen, der angiver starten af det ydre lederør.

Det ydre lederør kan slutte op i en karrusel. Karrusellen består af en tynd, buet messingstang, hvori der er udskåret en rille, hvori pillen kan glide. Anvendelse af en sådan er betinget af et ønske om en mindre spredning i pillens retning, når denne forlader lederøret. Anvendeligheden er begrænset af pillens hastighed, da høje pillehastigheder vil resultere i en ødelæggelse af pillerne i karrusellen. Langsomme piller med stor spredning kræver anvendelse af karrusel; hurtige piller med mindre spredning kræver ikke nødvendigvis brug af karrusel.

Lederøret ender op i et differentialpumpekammer.

Differentialpumpekammer.

Formålet med differentialpumpekammeret er, at det skal forhindre eventuel af-fyringsgas i at nå ind i maskinen.

Differentialpumpekammeret udgør den sidste del af lederørsystemet. Kammerets volumen/design afhænger primært af ydre omstændigheder såsom turbopumpens størrelse og diagnostikkens omfang (hvis den er placeret i kammeret). Af-fyringsgassen er af sekundær betydning, da denne primært fjernes af turbopumpen tilsluttet vakuumkammeret, samt at lederøret formindsker affyringsgassens flow.

I kammeret bør der være et tryk, der er mindre end eller sammenligneligt med trykket i maskinen, ellers vil maskinens vakuum blive ødelagt, når indgangsporten åbnes, og pillen skal injiceres.

Kobles injektoren direkte på kammeret uden brug af lederør, bør man tilslutte et differentialpumpekammer. Bruger man lederør, behøver man ikke altid differentialpumpekammeret, da lederøret i sig selv virker formindskende på gasflowet. Det afhænger naturligvis af gasmængden.

Diagnostik.

For at kunne bestemme parametre for pillerne, må man anvende diagnostiske instrumenter.

De anvendte diagnostiske instrumenter er pilledetektorer og mikrobølgekaviteter.

En pilledetektor består af en lyskilde og en fotodetektor placeret overfor hinanden på hver side af pillebanen. Ved hjælp af en spalte placeret foran lyskilden, får man et veldefineret belyst areal på fotodetektoren. Den veldefinerede lysmængde konverteres via fotodetektoren til et elektrisk signal, der er proportionalt med det belyste areal. Når pillen passerer spalteåbningen, vil det belyste areal formindskes, da pillen skygger for lyskeglen. Herved vil det elektriske signal ændres, og det er denne ændring, man detekterer.

Til måling af hastigheden kræves der 2 pilledetektorer placeret i en veldefineret afstand fra hinanden langs pillebanen.

Signalerne kan endvidere anvendes til at trigge eksperimenter.

Mikrobølgekaviteten bliver anvendt til måling af pillens masse. Pillen passerer gennem kaviteten, og ændrer herved dennes egenfrekvens. Ændringen i egenfrekvensen konverteres til et elektrisk signal, der er proportionalt med pillens masse.

Diagnostikken kan reelt placeres, hvor man ønsker mellem injektoren og differentialpumpekammeret, hvis der anvendes lederør, der er transparent og ikke-metallisk. Den kan også placeres i differentialpumpekammeret som gjort ved Padova injektoren (se kapitel 4).

Dog er det nok mest hensigtsmæssigt at placere pilledetektorerne i differentialpumpekammeret, hvor pillen er i fri flugt, og ikke er omgivet af lederøret. Lederøret kunne forårsage spredning af lyset på en sådan måde, at pillen ikke blev detekteret, hvorved hastighedsmålingen gik tabt. Endvidere kan hastighedsmålingen være mere troværdig sidst i lederørssystemet på grund af eventuelt tab af hastighed i lederøret. Dette er dog mest udbredt for langsomme piller.

Elektronisk styring.

Til operation af injektoren bruges en PLC. Maskinen har eget styringssystem.

Da hver maskine er individuelt designet, hvad angår levetid, partikeltæthed, plasmaudstrækning osv., så vil elektronikken, der skal sørge for samkøringen, være individuelt designet til hver maskine.

3.2 Er injektoren ens fra maskine til maskine?

I afsnit 1 blev det fremhævet, at injektoren bør opfattes som bestående af flere dele og ikke kun af den kryogene del.

Tekniske specifikationer for de 3 maskiner.

DANTE	R (max. radius) = 50 cm a (min. radius) = 12.5 cm $V_{\text{plasma}} = 0.1 \text{ m}^3$ $B_T = 0.8 \text{ T}$ $I_{\text{plasma}} = 20 \text{ kA}$ $T_e = 0.2 \text{ KeV}$ $n_{\text{plasma}} = 2 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ levetid 40 ms
TFR	R (max. radius) = 98 cm a (min. radius) = 22 cm $V_{\text{plasma}} \approx 1 \text{ m}^3$ $B_T = 6 \text{ T}$ $I_{\text{plasma}} \leq 600 \text{ kA}$ $T_e = 1-1.9 \text{ keV}$ $T_i = 0.8-2 \text{ keV}$ $n_{\text{plasma}} = 2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ levetid $\leq 500 \text{ ms}$
ETA-BETA II	R (max. radius) = 65 cm a (min. radius) = 12.5 cm $V_{\text{plasma}} = 0.2 \text{ m}^3$ $I_{\text{plasma}} \leq 300 \text{ kA}$ $T_e = 0.1 \text{ keV}$ $T_i = 0.1 \text{ keV}$ $n_{\text{plasma}} \leq 5 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ levetid 2 ms

Tabel 1.

Data er hentet fra "World Survey of major activities in controlled Fusion Research", 1982 Edition.

Forklaring til ovennævnte data:

- a : er torussens radius (sammenlignelig med plasmaets udstrækning)
- V_p : er plasmaets volumen

T_e, T_i : er henholdsvis elektron- og ion temperaturen, et udtryk for plasmaets temperatur
 n_p : er plasmaets tæthed
(levetid): er den tid maskinen, magnetfeltet formår at holde på plasmaets energi.

Kryogen del og vakuumkammer.

DANTE.

Ekstrusionsinjektor

Affyring ved hjælp af "pulsopvarmning" af et kammer indeholdende kondenseret brintgas.

$P_{\text{affyr}} = 5 \text{ bar cm}^3$

Længde af bøsseløb: 61 mm

Hastighed: 100-200 m/s

Delay: 60 ms (p.g.a. pulsopvarmning)

Pilledimension: 0.4 mm længde

0.4 mm diameter

Antal molekyler pr. pille: $5 \cdot 10^{17}$ molekyler

Minimum 3 minutter mellem affyringerne.

TFR.

Samme injektor som ved Dante med modifikationer.

Ekstrusionsinjektor

Affyring ved hjælp af hurtigventil.

P_{affyr} : 8-20 bar

Længde af bøsseløb: 115 mm

Hastighed: 640 m/s \pm 60 m/s

Delay: 3-5 ms

Pilledimension: 2.3 mm længde

3.6 mm diameter

Antal molekyler: $8 \cdot 10^{18}$ molekyler

Minimum 3 minutter mellem affyringerne.

ETA-BETA II.

Ekstrusionsinjektor

Affyring ved hjælp af hurtigventil

$P_{\text{affyr}} \approx 0.5 \text{ bar}$

Længde af bøsseløb: $\approx 50 \text{ mm}$

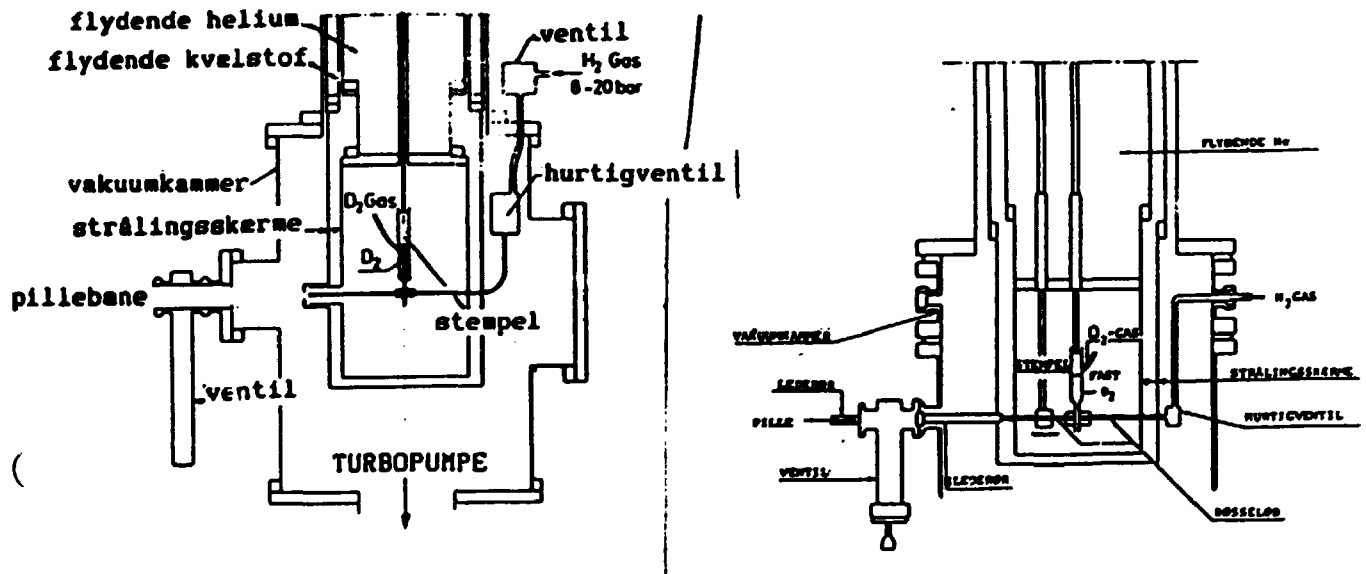
Hastighed: $100 \text{ m/s} \pm 10 \text{ m/s}$

Delay: 3-5 ms

Pilledimension:	lille pille	stor pille
	0.69 mm længde	1.4 mm længde
	0.38 mm diameter	0.7 mm diameter

antal molekyler	antal molekyler
$2.3 \cdot 10^{18}$	$6.4 \cdot 10^{19}$

Minimum 3 minutter mellem affyringerne



Figur 3.2.

Skematiske tegninger af henholdsvis
TFR's (a) og ETA-BETA II's (b)
kryogene dele inklusive vakuumkanter.

Figur 3.2 viser den kryogene del af henholdsvis TFR og ETA-BETA II med tilhørende vakuumkanter.

Som det bemærkes af figurerne er opbygningen af den kryogene del af injektorerne tildels ens. Placeringen af hurtigventilen er forskellig ved de to

injektorer. Ved TFR var den placeret lidt over bøsselebens niveau inde i vakuunkammeret, hvorimod ved ETA-BETA II var den placeret i niveau med bøsselebet. Placeringen af hurtigventilen ved ETA-BETA II injektoren bevirkede, at flowbetingelserne for affyringsgassen blev forbedret; man opnåede, at trykfronten ikke nåede at aftage væsentligt hen til pillen, dvs. man opnåede en bedre styring af affyringen. Vakuunkamrenes udformning er også forskellige. Ved begge injektorer var der anvendt plastikrør mellem hurtigventilen og bøsselebet for at minimere varmeflowet ude fra og ind til bøsselebet.

Lederørsystemet.

Ved alle 3 injektorer blev der anvendt ydre lederør. Dette var muligt, da hastighederne ikke oversteg 1250 m/s.

DANTE.

nylonrør 4 m langt, 2 mm i.d., 4 mm y.d.

TFR.

nylonrør 4.5-5 m langt, 2 mm i.d., 4 mm y.d.

ETA-BETA II.

nylonrør \approx 4 m langt, 2 mm i.d., 4 mm y.d.

DANTE.

Her blev der anvendt karrusel i starten såvel som i slutningen af lederøret for dels 1) at være sikker på at ramme ind i lederøret (spredning $< \pm 1^\circ$), dels 2) at være sikker på at pillen forlod lederøret med en spredning på $< \pm 1^\circ$. Karrusellen var anvendelig, da hastigheden lå mellem 100-200 m/s.

DANTE var sådan udformet, at vertikal injektion (oppe fra og nedefter) blev foretrukket. Ved vertikal injektion undgik man problemet vedrørende tilbagespredning af fragmenter af pillen i det endnu eksisterende plasma. Man installerede et dummyrør på maskinen i pillens bevægelsesretning, så pillens flyvetid blev forøget, og man herved undgik, at pillen blev fragmenteret, inden plasmaet var udsukt.

Lederøret blev brugt dels til at opnå variation i injektion af pillerne, dels til at adskille de 2 vakuumsystemer og dels til at transportere pillerne over til maskiner.

TFR.

Der blev ikke anvendt karrusel, da hastigheden var høj, 700 m/s. Der blev

heller ikke anvendt indre lederør af samme årsag.

Lederøret blev anvendt som "karrusel", ved at benytte sig af en stor krumningsradius på lederøret. Spredningen skulle være under $\pm 1^\circ$, da pillen skulle bevæge sig 1-1.5 m i fri flugt, efter den havde forladt lederøret. Dette blev opnået ved en krumningsradius på 1 m sidst i lederøret. Injektionen foregik horisontalt.

Lederøret blev brugt dels til at adskille de 2 vakuumssystemer, dels til at transportere pillen over til maskinen.

ETA-BETA II.

ETA-BETA II er en "reversed field pinch".

Her blev der anvendt karrusel i slutningen af lederøret, da pillen skulle injiceres ind til plasmaet gennem et radiært rør gående skråt opad med en diameter på 25 mm. Afstanden fra karrusel til plasma var ≈ 1.4 m. Disse krav betød, at spredningen i pillens bevægelsesretning skulle være $< \pm 0.5^\circ$.

Lederøret blev brugt dels til at opnå variation i injektion af pillerne, dels til at adskille de 2 vakuumssystemer, dels til at transportere pillerne over i maskinen, og dels til at adskille maskine og injektor elektrisk.

Differentialpumpekammer.

DANTE.

Injektionen foregik direkte fra lederøret. Der blev ikke anvendt differentialpumpekammer, da gasmængden, der ankom til maskinen var negligerbar, samt at diagnostikken var placeret langs lederøret.

TFR.

Ved TFR blev der anvendt differentialpumpekammer, da man havde et relativt højt affyringstryk. Lederøret sluttede i differentialpumpekammeret. Efter differentialpumpekammeret var der et forkammer, hvorpå der også blev pumpet. Kamrene var adskilt med en ventil.

Forkammeret og differentialpumpekammeret sørgede for, at der ikke slap nogen affyringsgas med over fra injektoren til maskinen.

ETA-BETA II.

Der blev anvendt differentialpumpekammer. Kammeret blev anvendt for at fjerne

eventuel affyringsgas og til opbevaring af diagnostikken (pilledetektorer og mikrobølgekavitet.)

Diagnostik.

DANTE.

Der blev anvendt pilledetektorer (3 styk). De blev anvendt dels til at måle pillens hastighed, dels til at trigge maskinen. Endvidere blev der anvendt en mikrobølgekavitet til måling af pillens masse.

TFR.

Der blev anvendt pilledetektorer (4 styk). Pilledetektorernes signaler blev anvendt dels til at måle pillens hastighed, dels til at trigge ønskede målinger, når pillen var inde i plasmaet.

ETA-BETA II.

Der blev anvendt pilledetektorer (2 styk). Disse blev anvendt dels til at måle pillens hastighed, dels til at trigge maskinen. Endvidere blev der anvendt en mikrobølgekavitet til måling af pillens masse.

Den elektroniske styring.

Injektorer opstillet ved TFR og ETA-BETA II havde deres egen elektroniske styring, en PLC. Injektoren opstillet ved DANTE havde ikke separat styringsenhed.

Opsummering.

	DANTE	TFR	ETA-BETA II
Kryoge- ne del + vakuum- kammer.	Ekstrusion "pulse hea- ting" $P_{aff} = 5 \text{ bar cm}^3$ $n_p = 5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$	Ekstrusion Hurtigventil 8-20 bar $= 8 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	Ekstrusion Hurtigventil $\approx 0.5 \text{ bar}$ $= 2.3 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ $= 6.4 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$
	+	+	+
Lederør- system.	vertikal in- jektion ÷ indre lede- rør	horisontal injektion, ÷ indre lede- rør	"skråt opad" injektion, + indre lede- rør
Differen- tia!pumpe- kammer.	÷	+	+
diagno- stik.	pilledetek- torer(3), mikrobølge- kavitet (1), placeret langs lederøret	pilledetek- torer(4), placeret langs lederøret	pilledetek- torer (2) og mikrobølge- kavitet(1), placeret i differential- pumpekammeret
Elektro- nisk sty- ring.	-	+	+

Diskussion af det foregående.

Som det fremgik af det foregående, var alle 3 injektorer af ekstrusionstypen. En fordel ved denne type er, at man kan udskifte den integrerede enhed dyse/bøsseløb og herved ændre pillens dimension efter behov. Pillens længde vil være bestemt af den integrerede enheds, dyse/bøsseløb, geometriske parametre:

$$L_2 = L_1 \cdot (d_0/d_1)^2$$

hvor L_2 er længden af pillen, L_1 er diameteren/tværsnittet af ekstrusionskanalen, og d_0 og d_1 er henholdsvis ydre og indre diameter af bøsseløbet. Pillestørrelserne var: DANTE $5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, TFR $8 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ og ETA-BETA II $2.3 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ og $6.4 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$.

Pillehastigheden varierede fra eksperiment til eksperiment. Ved DANTE var den 100-200 m/s, ved TFR var den 640 m/s ± 60 m/s, og ved ETA-BETA II var den 100 m/s ± 10 m/s. At pillehastigheden varierer fra eksperiment til eksperiment, hænger sammen med plasmaets udstrækning i maskinen. TFR krævede den største pillehastighed, hvilket også er rimeligt, da dens plasma havde den største udstrækning på omtrent 22 cm i radius. De to andre maskiners plasma havde en udstrækning på omtrent 12.5 cm i radius (DANTE havde normalt en på 11.5 cm i radius). For disse 2 maskiner var pillehastighederne tilsvarende små, 100-200 m/s.

Derfor kan man i første omgang drage følgende konklusion:

At jo større udstrækning plasmaet har, jo højere skal pillens hastighed være, hvis den skal have en chance for at overleve og nå ind i plasmaets centrum.

På grund af den store udstrækning af plasmaet skal pillen bevæge sig længere tid i plasmaet med det til følge, at der fordamper mere pillemateriale. Fordampningsmængden afhænger af plasmaets temperatur.

Heraf kan følgende konklusion drages:

At jo større udstrækning plasmaet har, jo større bør pillen være.

Allerede her kan man indvende noget mod de generelle retningslinier. Den store pille ved en større plasmaudstrækning er en sandhed med modifikation, da pillens størrelse må dimensioneres efter plasmaets tæthed. Dette kan eksempelvis ses ved sammenligning mellem ETA-BETA II og TFR. TFR's plasmaudstrækning var ≈ 22 cm i radius, og ETA-BETA II's var ≈ 12.5 cm i radius, hvilket kun-

ne foranledige en til at tro, at pillen til TFR burde være større, men de var faktisk af samme størrelsesorden, hvilket grunder i det forhold, at maskiner-nes plasmætæthed var af samme størrelsesorden ($\approx 10^{14} \text{ cm}^{-3}$). Størrelsen af pillen bør også afhænge af plasmaets temperatur, dvs. pillens størrelse bør optimeres udfra plasmætætheden og -temperaturen.

Konklusionen/læren, man bør drage af dette, er:

At man bør kombinere pillens størrelse og hastighed optimalt på en sådan måde, at pillen overholder de restriktioner, maskinen udstikker ud fra dens tekniske specifikationer, af hvilke kan nævnes: plasmatemperatur, plasmætæthed og plasmaudstrækning.

At plasmætætheden bør inddrages, grunder i den kendsgerning, at en for stor pille i forhold til plasmætætheden kan resultere i en ødelæggelse af maskinens feltkonfiguration.

Pillestørrelsen blev ændret ved at skifte dyse/bøsseløb.

Pillehastigheden kan ændres ved at ændre følgende parametre:

- 1) P_{aff} , affyringstrykket
- 2) flowbetingelserne for affyringsgassen
- 3) bøsseløbets længde (accelerationsvejlængden)
- 4) pillens længde
- 5) pillens tæthed
- 6) affyringsgassens temperatur

At affyringstrykket er bestemmende for pillehastigheden, kan ses ud fra sammenligning mellem ETA-BETA II og TFR's pillehastigheder og tilhørende affyringstryk:

$$\begin{array}{ll} \text{ETA-BETA II: } P_{\text{aff}} = 0.5 \text{ bar} & V_{\text{pille}} = 100 \text{ m/s} \\ \text{TFR: } P_{\text{aff}} = 8-20 \text{ bar} & V_{\text{pille}} = 600-700 \text{ m/s} \end{array}$$

Af ændrede flowbetingelser kan nævnes en ændring dels af længden af røret, dels tværsnittet af røret, dels hurtigventilens placering på bøsseløbet, og dels mekaniske ændringer ved hurtigventilen (f.eks. lysningen).

Eksperimentel eftervisning af at pillens hastighed bestemmes af affyringstrykket og bøsseløbets længde er gjort af H. Sørensen og hans medarbejdere (SØ85).

Der blev anvendt lederør ved alle 3 maskiner, da hastighederne ikke oversteg 1250 m/s. At man ikke bør anvende lederør til piller med hastigheder

større end 1250 m/s, er eftervist af Sørensen (5085). Brug af karrusel ved både DANTE og ETA-BETA II kunne lade sig gøre, da hastighederne var små, hvorimod ved TFR, hvor hastigheden var en faktor 3-3.5 større, benyttede man sig af krumningsradius til spredningsformindskelse, da centrifugalkraften er proportional med r_{krum}^{-1} . Karrusellen vil slå pillerne itu, hvis de har en for høj hastighed.

Altså kan man ikke anvende karrusel ved høje pillehastigheder, og lederør bør ikke anvendes ved pillehastigheder over 1200 m/s.

Vedrørende samkøringen er der følgende forskelle. Man havde stor pillehastighed, 640 m/s \pm 60 m/s, ved TFR og samtidig en stor plasmalevetid på mindre end 500 ms; hvorimod for ETA-BETA II havde man en lav pillehastighed, 100 m/s \pm 10 m/s, og en kort plasmalevetid på 2 ms. Dette betød, at TFR skulle trigge injektoren, hvorimod ved ETA-BETA II var det maskinen, der skulle trigge injektoren. Altså kan man generelt sige at:

kort plasmalevetid og lav pillehastighed: injektor trigge maskinen,

lang plasmalevetid og høj pillehastighed: maskinen trigge injektor.

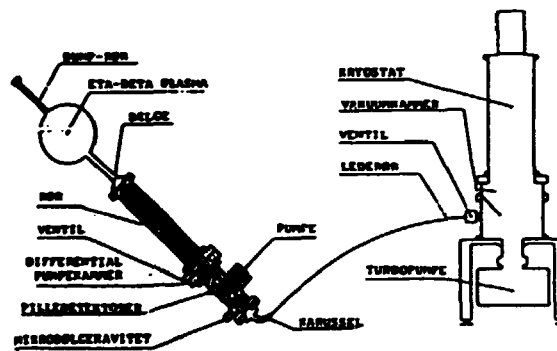
Dette er naturligvis en "tommelfingerregel". Som ved de andre anførte ting, er der igen "flydende grænseflader". Har man en høj pillehastighed og en relativt kort plasmalevetid, er det ingen generel løsning, man er tvungen til at vurdere omstændighederne nærmere og her udfra konkludere, hvem der skal trigge hvem.

Som det er blevet fremhævet i indeværende kapitel, består injektoren af flere separate men samtidig uadskillige dele. Endvidere er det fremhævet, at hver pilleinjektor (som regel) skal konstrueres og opbygges individuelt til hver maskine p.g.a. maskinernes individuelle specifikationer. Individualiteten giver sig udtryk i udformningen af de enkelte dele (eller en del af dem), som injektoren består af.

KAPITEL 4

Padova-injektoren.

I forrige kapitel blev der foretaget en sammenligning mellem 3 injektorer, hvoraf den ene var injektoren leveret til Istituto Gas Ionizzato i Padova i Italien, ETA-BETA II. Hele injektoren (opstillingen) er vist i figur 4.1 nedenfor. En mere fyldestgørende beskrivelse af de enkelte dele af injektoren vil finde sted i indeværende kapitel.



Figur 4.1.

Hele opstillingen indehol-
dende injektoren og ETA-BETA II.

Kryogene del og vakuumkammer.

Kryostat og vakuumkammer.

Den anvendte kryostat var af den kommercielle type Oxford Instruments MD 5.

Injektorenheden er placeret på heliumbund. Etablering af termisk kontakt mellem de enkelte dele af injektorenheden og heliumbund foregik via 4 kobberstænger placeret på heliumbund.

De elektriske ledninger til henholdsvis termometre/heatere samt rør til deuterium- og brintgas (affyringsgassen) blev alle ledt ind igennem den øvre del af vakuumkammeret, der var todelt. Ledninger til termometre og heatere var delt i 2 bundter. De 2 ledningsbundter var først spundet omkring kvælstofreservoiret og koblet termisk til dette ved brug af lak. Herefter svævede bundtet frit for til sidst at blive spundet rundt om heliumreservoiret, hvorpå

det var koblet termisk ved brug af lak. Den termiske kobling af ledningerne til henholdsvis kvælstofreservoiret og heliumreservoiret blev foretaget for at minimere varmetransporten ind til termometrene m.v.

Hurtigventilen var placeret inde i vakuumkammeret ved stuetemperatur. Brintgas inletrøret var i direkte kontakt med hurtigventilen kun adskilt med et plastikrør. Deuteriumgas inletrøret var derimod koblet termisk til både kvælstof- og heliumreservoiret. Den sidste del af deuteriumgas inletrøret var af plastik. Plastikrør anvendes som samling mellem to dele, hvor der er en kraftig temperaturforskel og hermed en stor varmetransport, man minimerer varme-flowet.

Fra heliumbund og op til toppen af kryostaten gik der 2 stålrør. De 2 stålrør var koblet termisk til kryostatens bund. Stålrør, der foretog de mekaniske bevægelser, var ført ned fra topflangen placeret oven på kryostaten og ned igennem de ovennævnte stålrør, og var stivet af i rørerne ved hjælp af teflon-"spacers". Det ene rør blev brugt til operation af stemplet under ekstrusion, og det andet rør blev brugt til at udtage pillen og lade denne ind i bøsse-løbet.

Den øvre del af vakuumkammeret kunne løftes af sammen med kryostaten. Der blev pumpet på vakuumkammeret med en turbopumpe af fabrikatet Pfeiffer og typen IPH 270.

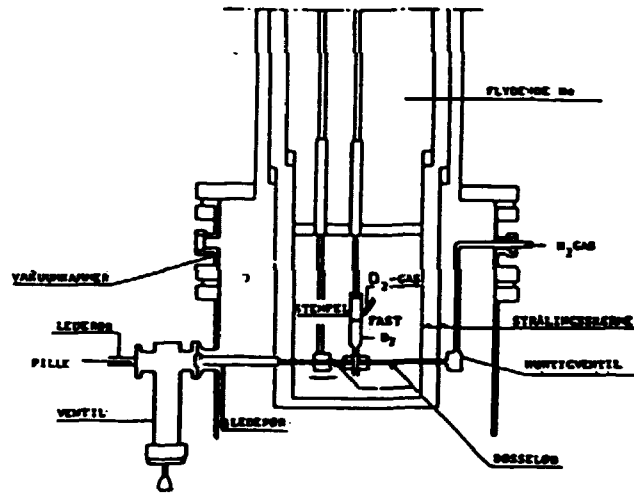
Injektorenheden.

Injektorenheden var placeret på heliumbund og beskyttet af 2 strålingsskærme, den ene ved kvælstoftemperatur og den anden ved heliumtemperatur. Skærmene var af udglødet kobber, og var belagt med sølv. Dette er vist skematisk i figur 4.2.

Første led i pilledannelsesprocessen er kondensation af deuteriumgas og efterfølgende ekstrusion af den faste deuterium. En skematisk tegning af injektorenheden er vist i figur 4.3.

Ekstrusion og færdiggørelse af pillen til affyring kan deles op i følgende punkter:

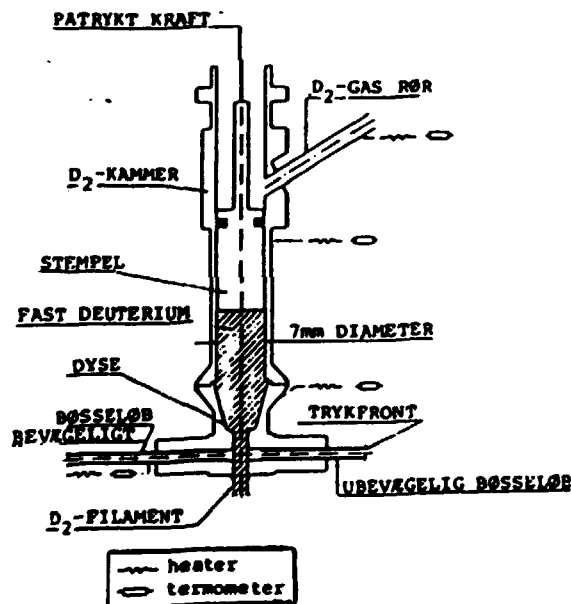
- Kondensation af deuteriumgas: deuteriumgassen ledes ind i deuteriumkammeret, hvor det kondenserer;
- Sammenpresning af den faste deuterium (for at få en bedre konsistens);
- Ekstrusion af den faste deuterium: den faste deuterium udsættes for varme og tryk, hvorved dets tilstand bliver plastisk.



Figur 4.2.

Skematisk tegning af injektorenhed,
vakuumkanter og strålingsskærme.

Deuteriumkammerets temperatur er ≈ 8 K, og dysens temperatur er ≈ 10 K. Den faste deuterium passerer først gennem et rør, herefter gennem en kanal i ud-



Figur 4.3.

Skematisk tegning af injektorenheden
inklusiv heatere og termometere.

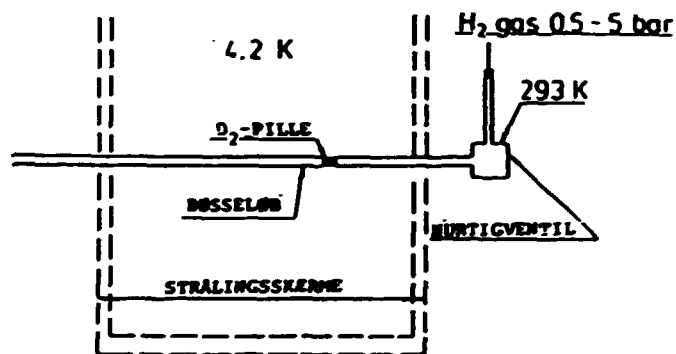
tagningskammeret for til sidst at dukke op neden under udtagningskammeret;

- Udtagning af pille fra ekstruderet filament: den bevægelige del af bøsse-
løbet (forrest) bevæges ind igennem filamentet og udtager en pille, der her-
ved transporteres baglæns og presses ind i bøsseløbet under deformation.

Bøssen er nu ladet og parat til affyring. Dette er vist skematisk i figur
4.4.

Det bør fremhæves, at ekstrusionen er en kompliceret proces, og det faktisk
kun er indenfor et lille temperaturinterval, at processen fungerer tilfreds-
stillende.

Ekstrusionsstempet var i forbindelse med et øvre stempel placeret oven på
kryostaten. Dette blev opereret ved hjælp af komprimeret luft eller kvælstof.



Figur 4.4.

Skematisk tegning af
ladt injektor.

Ved operation af bøssen var det nødvendigt at opvarme forskellige dele af
injektorenheden og samtidig måle delenes temperaturer. Til dette formål var
der koblet 5 termometre og 4 heatere på bøssen, disse er vist på figur 4.3.

Ved affyring af pillen benyttede man sig af "pulsopvarming" af bøsseløbet.
Ved "pulsopvarmning" opvarmes pillen meget kraftigt i kort tid, så at pillen
lige netop løsnes fra bøsseløbets overflade. Herved opvarmes kun pillens over-
flade. Det blev fundet mest hensigtsmæssigt at køre injektoren sådan, da in-
jektoren skød upåklageligt ved denne form for opvarmning/affyring.

En stor mængde brintgas og deuteriumgas vil optræde i vakuumkammeret efter affyringen stammende fra henholdsvis affyringsgassen og deuteriumfilamentet. Brint- og deuteriumgassen vil blive kryopumpet af strålingsskærmens overflader, da de er kølet ned til dels flydende kvælstofs temperatur, dels flydende heliums temperatur. Derfor optræder kryostaten som en kryopumpe. Brints damptryk er omkring $5 \cdot 10^{-6}$ mbar ved 4.2 K. Derfor kan trykket ikke være bedre end dette efter affyring.

Termometrene, der blev omtalt ovenfor, var kommercielle kulmodstande af typen Allan-Bradley. Deres modstand, der vokser med aftagende temperatur, er ved stuetemperatur 68 ohm. De er kendetegnet ved at være særdeles følsomme ved temperaturer under 20-30 K. Eksempelvis var modstanden ved 10 K omkring 220 ohm og ved 4.2 K omkring 700 ohm. Der blev anvendt manganintråd mellem kulmodstanden og kobberledningerne for at minimere varmeflowet ind til kulmodstanden, man opnår en "rigtigere" temperaturmåling.

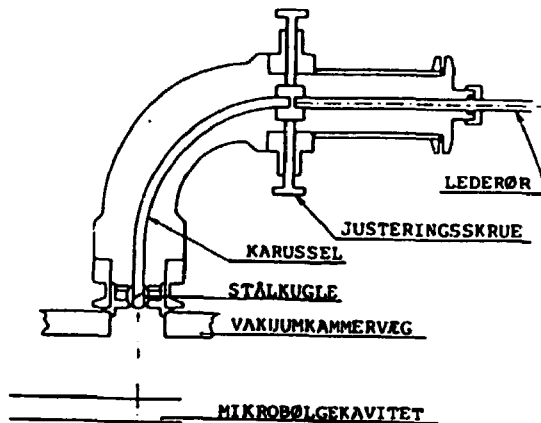
Lederørsystemet.

Lederørsystemet var delt op i 3 dele: indre lederør, ydre lederør og karrusel.

Pillen transporteres fra bøsseløbet hen til ventilen, der angiver slutningen af kryostatens vakuumsystem, i et indre lederør (figur 4.2). Pillen passerer ventilen og fortsatte ud i en tragt, der mundedes ud i det ydre lederør. Tragten blev anvendt for at opsamle pillerne og dirigere dem på rette vej.

På grund af det ≈ 1.2 m lange snævre rør, 25 mm i diameter, mellem differentialpumpekammer og plasma var der strenge krav til pillens spredning, når den forlod lederøret; spredningen skulle være mindre end $\pm 0.5^\circ$. Ved brug af en karrusel vist i figur 4.5., der optrådte som koblingsled mellem ydre lederør og differentialpumpekammeret, opnåede man en spredning af pillen på mindre end $\pm 0.5^\circ$.

Karrusellen bestod af en tynd messingstang placeret i et vakuumtæt kobber-rør, i hvilken der var udskåret en rille, hvori pillen kunne glide. Den ene ende af messingstangen var placeret i en roterbar stålkugle, og den anden ende var sammen med lederøret placeret i en messingklods, der kunne bevæges ved hjælp af skruer ude på kobberhuset. Pillen vil forlade karrusellen som tangent til slippunktet i den udskårne rille i slutningen af messingstangen.



Figur 4.5.
Skematisk tegning af karrusel.

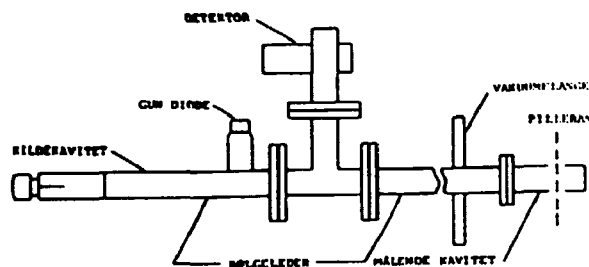
Differentialpumpekammer og diagnostik.

Differentialpumpekammeret var et T-stykke med CF 100 flanger. Kammeret var koblet på et af ETA-BETA II's radiære rør.

Der blev anvendt pilledetektorer og mikrobølgekavitet til måling af henholdsvis pillehastighed og pillemasse. Begge diagnostiske enheder var placeret på CF 35 flanger på kammeret, og pilledetektorerne var placeret med en afstand på 100 mm.

Mikrobølgekaviteten, der er vist på figur 4.6 består egentlig af 3 dele: 1) kildekaviteten (justerbar), hvor energien genereres ved brug af gun diode, 2) detektorenhed og 3) den målende kavitet (justerbar), hvor pillen passerer igennem.

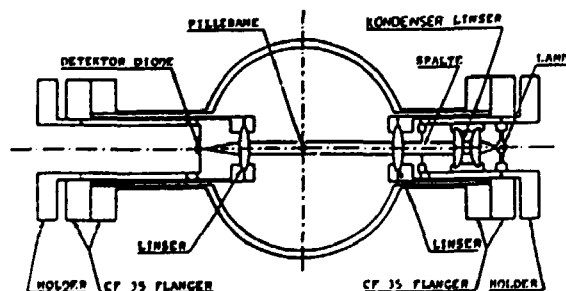
Mikrobølgekaviteten var placeret således, at hullerne i kaviteten stemte overens med pillens bane. Hullerne i kaviteten, hvor igennem pillen passerede, var små, 2.3 mm i diameter, og afstanden mellem kaviteten og slippunktet i karrusellen skulle derfor være kort. Frekvensen var omkring 14 GHz, kavitets indre dimensioner var 16.0 x 7.9 mm (tværsnit). Da en del af kaviteten var under vakuum, blev der placeret et quartzvindue i kaviteten. Mikrobølgekaviteten mistunes, så man befinder sig på den lodrette del af resonanskurven, hvor signalet er mest følsomt.



Figur 4.6.
Skematisk tegning af
mikrobølgekavitet.

Når pillen passerer pilledetektoren vist i figur 4.7., passerer pillen gennem en lysbarriere, der er genereret dels af linser, dels af en spalte ($6 \times 0.4 \text{ mm}^2$). Lyset detekteres af en fotodetektor, der er placeret sammen med en elektronisk forforstærker over for lyskilden i pillens bane. Det belyste areal konverteres til et elektrisk signal.

Ved hjælp af detektorsignaler og en veldefineret afstand mellem detektorerne beregnes pillens hastighed. Kendes afstanden fra den sidste pilledetektor og hen til plasmaet, kan man beregne pillens ankomsttidspunkt ud fra hastigheden. Kendskab til tidspunktet bevirker, at man kan synkronisere affyringen af ETA-BETA II med ankomsten af pillen. Synkroniseringen er beskrevet nedenfor.



Figur 4.7.
Skematisk tegning
af pilledetektor.

Den elektroniske styring.

Som nævnt ovenfor var der problemer med samkøringen af injektoren og ETA-BETA II. Der var problemer dels i sekundområdet, dels i millisekundområdet.

Det første problem var at sørge for at den tid, det tager injektoren at blive parat til affyring, og den tid, det tager ETA-BETA II at blive parat til affyring, var ens. At gøre injektoren parat til affyring tog 40-50 sekunder. Det tog derimod ETA-BETA II's kapacitorbanke 70 sekunder at lade op. At de to forberedelsestider var ens, opnåede man ved at putte et startdelay ind i injektoren. Delayet gik fra 10-220 sekunder efter eget valg. At samkøringsproblemet eksisterede skyldtes ene og alene:

- 1) at injektoren skulle affyres lige efter, den var gjort parat til at skyde, da pillen ikke kunne vente i børseløbet og endvidere
- 2) at ETA-BETA II's kondensatorbanke ikke havde godt af at stå opladet for længe, højst nogle få sekunder.

Det andet problem, i millisekundområdet, var vedrørende den endelige trigning af ETA-BETA II. Plasmaets levetid var 2 ms, pillens hastighed var 100 m/s ± 10 m/s, og vejlængden over til plasmaet var omkring 5.4 m. Dette betød, at det tog pillen 54 ms ± 5.4 ms at nå plasmaet. Tiden, det tog pillen at ankomme til plasmaet, havde da en usikkerhed, der lå udenfor plasmaets levetid, 2 ms; pillen kunne lige så godt komme før udladningen som efter udladningen.

Derfor var det nødvendigt, at injektoren triggede ETA-BETA II. Til dette blev pilledektorsignalerne brugt. Pilletimeren, der blev brugt i forbindelse med hastighedsmålingen, havde 2 outputværdier beregnet ud fra hastigheden, den ene til trigning af ETA-BETA II og den anden til indikering af når pillen passerede plasmaets centrum. Trigning af ETA-BETA II fandt sted, når pillen befandt sig mellem starten af det radiære rør og plasmaet.

Det bør til sidst nævnes, at hele problematikken, der er kommet til udtryk lige fra starten af rapporten, kapitel 1, afsnit 2, og til indeværende sted i rapporten blev bekræftet ved injektoren opstillet ved ETA-BETA II. Det er blevet fremført, at det er en meget kompleks sag at fremstille en injektor til en maskine, da mange forhold bør drages ind i vurderingsgrundlaget. En af de komplekse forhold er pillestørrelsen, der skal beregnes ud fra maskinens specifikationer, f.eks. plasmatæthed og -temperatur. Det viste sig, at de to pillestørrelser, 0.38 mm og 0.70 mm i diameter, italienerne havde regnet sig

frem til, ikke var gode nok til deres eksperiment, de var faktisk for små. En anden pillestørrelse blev forberedt, hvis dimension var:

1.5 mm i diameter og 3.00 mm i længde
svarende til en pillestørrelse på $\approx 2.0 \cdot 10^{20}$ molekyler.

Dette illustrerer netop, hvor svært det kan være eller er, at dimensionere injektoren efter eksperimentet (maskinen).

I indeværende kapitel er de enkelte dele, injektoren består af, blevet beskrevet nærmere. Kapitlet skal dels ses som et supplement til kapitel 3, der gav en summarisk beskrivelse af de enkelte dele injektoren består af, dels som en beskrivelse af Padova-injektoren.

KAPITEL 5

JET "Pipe-gun".

De indtil nu beskrevne injektorer (Padova, IFR, DANTE) har alle været baseret på ekstrusionsprincippet. Injektorerne kræver en "mekanisk" håndtering af pillen.

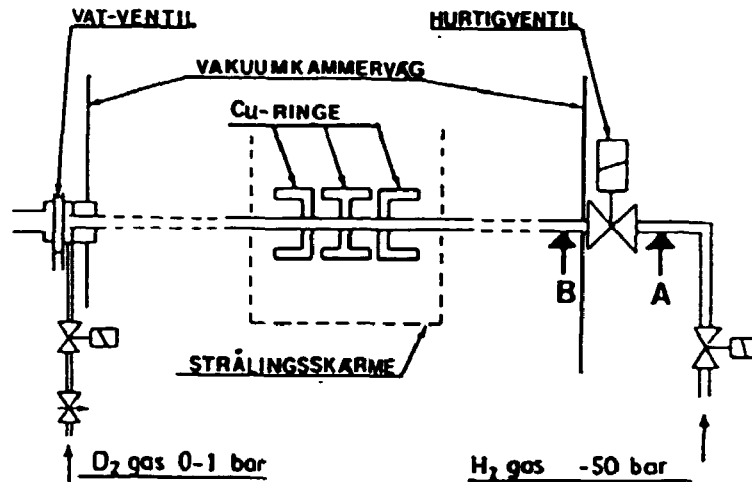
En anden metode at danne pillen på blev foreslået af Claudet og hans medarbejdere i Grenoble i Frankrig. Ved denne metode bliver pillen dannet ved "in-situ" kondensation i bøsseløbet, og bliver herefter skudt ud ved hjælp af en hurtigventil på samme måde som ved andre pneumatiske pilleinjektorer. Ved denne metode undgår man de mekaniske dele i injektoren. Det var amerikanerne, der navngav den.

Franskmændenes og amerikanernes design er baseret på Claudets design. Frysecellen bliver kølet ned ved brug af en flow-kryostat, og de to bøsseløb, fortil og bagtil, er koblet til frysecellen med flanger. Isolationen mellem bøsseløbene og frysecellen blev etableret vha. spændingsringe af polyimid. Ved hjælp af heatere placeret på bøsseløbene kunne man etablere temperaturgradienter over spændingene, så pillen kun dannes i frysecellen.

En mere simpel "pipe-gun" er blevet opbygget ved Risø. "Pipe-gun"en er illustreret i figur 5.1. "Pipe-gun"en bestod af et ubrudt rør af enten rustfrit stål eller messing, hvorpå der er placeret et antal cirkulære segmenter af enten udglødet kobber eller af messing inderst og udglødet kobber yderst. Til hver enkelt ring var der koblet en heater. Segmenterne er/kan være koblet individuelt termisk til heliumkryostaten (badkryostat) via kobbertråde, hvorved der allerede eksisterer temperaturgradienter mellem segmenterne.

En opstilling med en pilleinjektor af ekstrusionstypen er vist skematisk i figur 5.2A.

Opstillingen, hvori ekstrusionsinjektoren indgår, adskiller sig i grundprincippet fra opstillingen, hvori "pipe-gun"en indgår (se figur 5.2B). Forskellen i opstillingen mellem de to injektortyper grunder i følgende forhold. Ved "pipe-gun"-injektoren er injektorenheden "isoleret" fra vakuumkammeret på en sådan måde, at der ved affyringen ikke kan slippe affyringsgas ud i vakuumkammeret. Konsekvensen er, at al affyringsgas følger med pillen ud i lederøret og videre over til maskinen. Lederør og differentialpumpekammer ved maskinen vil sandsynligvis ikke være nok til at fjerne affyringsgassen. Disse

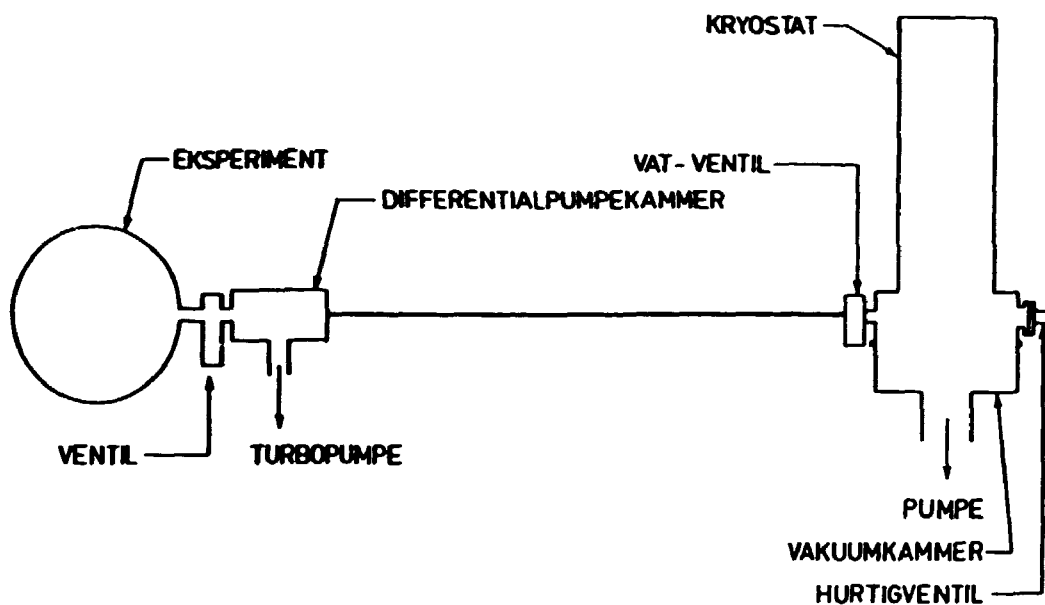


Figur 5.1.
Skematisk illustration
af "pipe-gun".

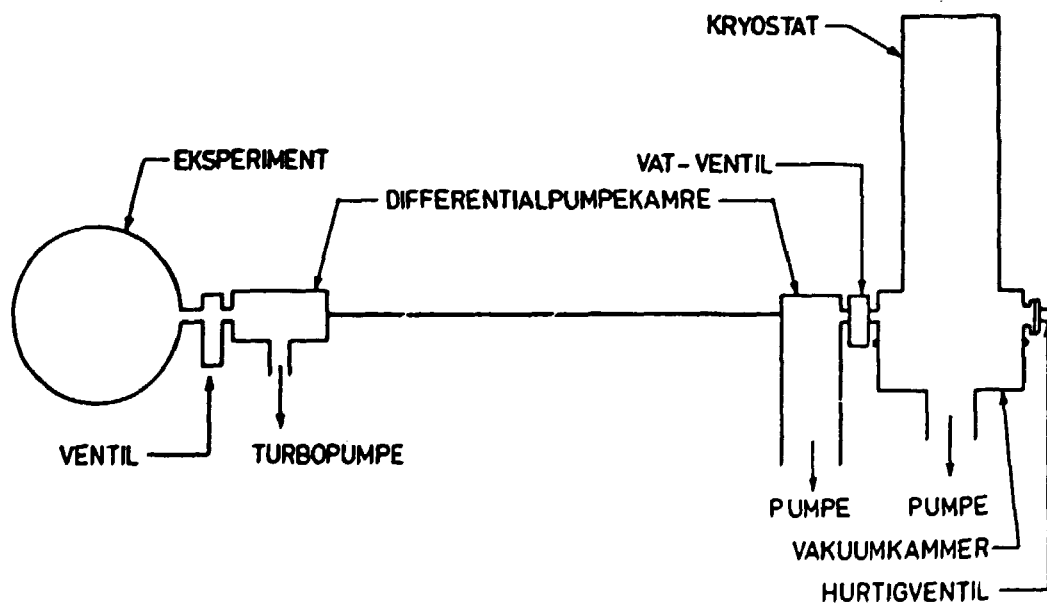
omstændigheder bevirker, at man er tvunget til at placere et differentialpumpekammer i starten af lederøret for herved at fjerne størsteparten af affyringsgassen. En opstilling med en pilleinjektor af "pipe-gun"-typen er vist i figur 5.2B.

Altså adskiller opstillingen med "pipe-gun"-injektoren sig fra opstillingen med ekstrusinsinjektoren ved, at der er placeret et differentialpumpekammer i starten af lederøret for at fjerne affyringsgassen.

PILLEINJEKTOR MED EXTRUSIONSØSSE

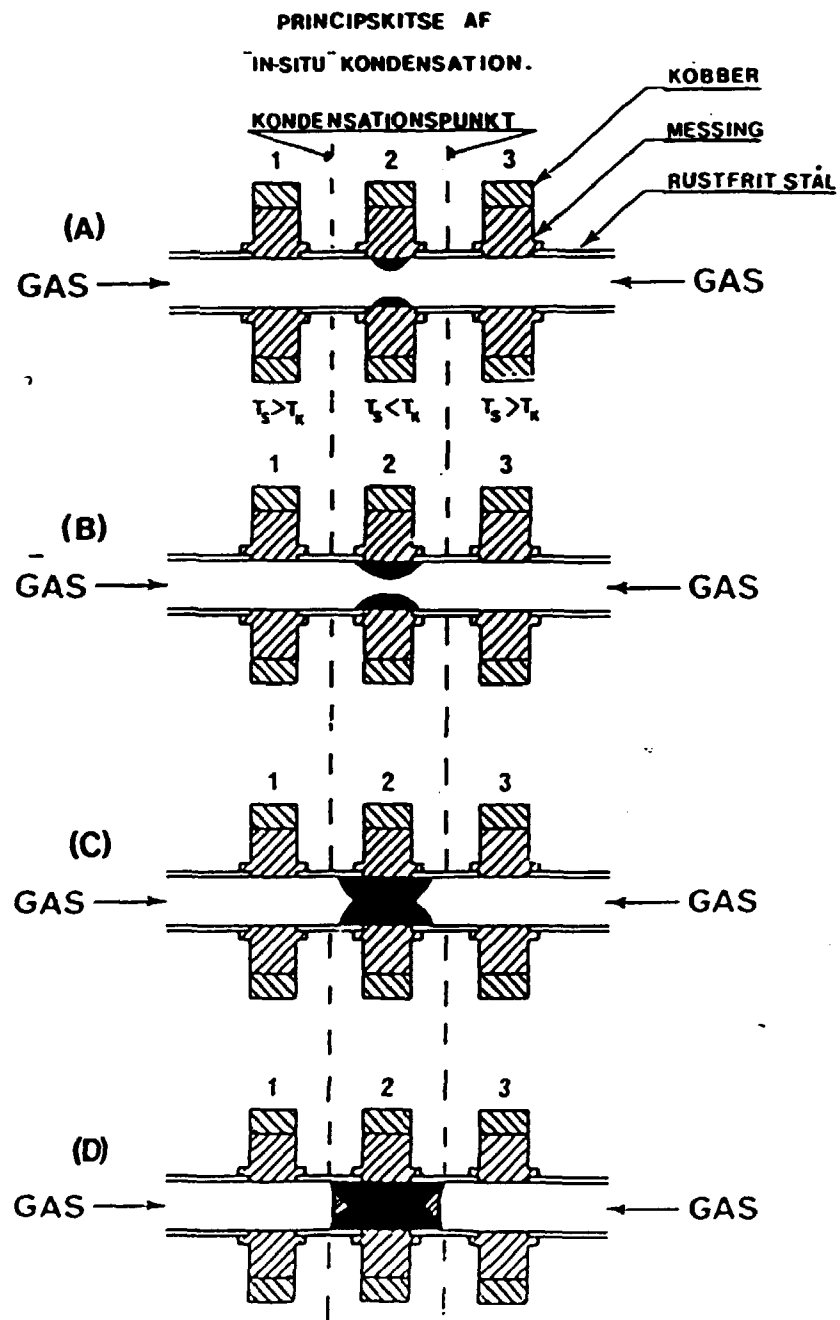


PILLEINJEKTOR MED "PIPE GUN"



Figur 5.2.

Skematisk illustration af forsøgsopstillinger med henholdsvis ekstrusions (a)- og "pipe-gun" (b)-injektor.



Figur 5.3.
Skitse af pilledannelses-
processen trin for trin.

Pilledannelsesprocessen i "pipe-gun"en er som skitseret ovenfor i figur 5.3, hvor T_s står for segmentets temperatur og T_k for kondensationstemperaturen (eventuelt identisk med triplepunkttemperaturen).

Ved pilledannelsen sendes gassen ind fra begge sider af "pipe-gun"en. Gassen sendes ind igennem henholdsvis VAI-ventilen og et rør placeret mellem sikkerhedsventilen (v.14 i figur 5.7) og hurtigventilen (v.15 i figur 5.7), punkt A i figur 5.1. Pilledannelsesprocessen starter ved centersegmentet, da kryopumpningseffekten er kraftigst der på grund af den lavere overfladetemperatur (A). Kondenseringen af gas vil herefter finde sted dels på børseløbets overflade, dels på den allerede kondenserede gas (B). På et tidspunkt vil børseløbet ved centersegmentet være fyldt ud med kondenseret gas (C), fast stof. På dette tidspunkt kan man tale om, at der er dannet en pille. Samtidig med fuldendelsen af pillen i centersegmentet kondenseres der løbende gas på børseløbets overflade. Kondenseringen på børseløbets overflade vil fortsætte ud til kondensationspunktet, hvor temperaturen er givet ved T_k (kondensationstemperaturen eventuelt identisk med triplepunkttemperaturen). Herefter vil gassen kun kondensere på den allerede kondenserede gas (D), det skraverede.

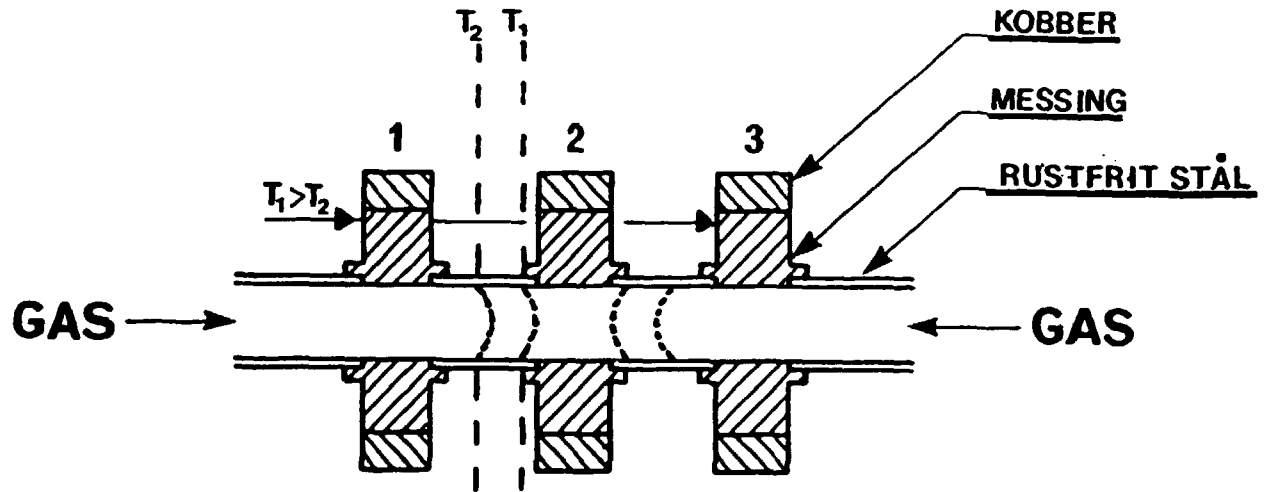
Ved at ændre temperaturen af ydersegmenterne kan man ændre temperaturgradienten og herved triplepunktets beliggenhed mellem segmenterne. Temperaturen kan ændres ved at afsætte mere eller mindre effekt på segmenterne. Følgende gælder: er ydersegmenternes temperatur lav (T_2), så er temperaturgradienten "lille" (triplepunktet er placeret "langt" ude) givende "stor" pille; er ydersegmenternes temperatur høj (T_1), så er temperaturgradienten "større" (triplepunktet er placeret tættere ved centersegmentet) givende "lille" pille. Dette er illustreret i figur 5.4.

Pillens udseende i enderne vil afhænge af, om der bliver ledt for meget eller for lidt gas ind til pillen. Pillens udseende kan checkes med et foto-grafi.

Injektorerne til store piller, der blev opbygget i sektionen, vil siden hen blive betegnet som "pipe-gun" 1, 2 og 3. En pumpestand med tilhørende gasfødesystem blev opbygget. Endvidere blev den nødvendige elektronik og diagnostik etableret. Skematisk blokdiagram over de elektroniske enheder, der indgik i opstillingen, er vist i figur 5.5.

Under indkøringen blev der løbende foretaget mekaniske såvel som program-

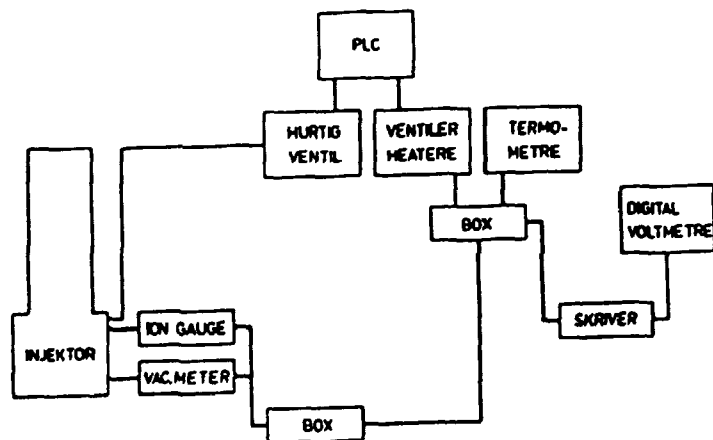
mæssige ændringer.



Figur 5.4.

Kondensationspunktets beliggenhed som funktion af ydersegmenternes temperatur.

BLOKDIAGRAM FOR ELEKTRONIKKEN



Figur 5.5.

Skematisk blokdiagram over elektronikken.

Opbygningen af en "pipe-gun" er væsentligt enklere end for en ekstrusionsinjektor. Man undgår dels de mekaniske dele i den kryogene del, dels gearmotor og stempel ovenpå kryostaten inkluderende de nødvendige rørgennemføringer. "Pipe-gun"-injektoren har også fordele fremfor ekstrusionsinjektoren, når injektion af tritiumpiller bliver aktuel p.g.a. de manglende mekaniske dele i den kryogene enhed og en heraf lettere håndtering af injektoren.

Da injektor og vakuumkammer er adskilte, vil der aldrig kunne opstå overtryk i vakuumkammeret ved opvarmning, da kryostaten/strålingsskærmene ikke optræder som kryopumpe for affyrings- og deuteriumgassen. Dette betyder også, at vakuumkammeret og kryostat ikke vil blive kontamineret med tritium. Endvidere tyder alt på, at "pipe-gun"en vil blive den injektortype, der vil blive satset på fremover. Endnu en umiddelbar fordel ved "pipe-gun"en er, at pillen kan dannes ved en tilnærmelsesvis konstant temperatur, da temperaturvariationen kan mindskes ved at danne pillen ved en så lav temperatur (tryk) som muligt. Ved ekstrusionsinjektoren bliver pillematerialet udsat for skiftevis opvarmning og afkøling, hvilket kunne bevirke, at pillen i sig selv ville være af mindre god kvalitet end en pille dannet i en "pipe-gun". Dog bør en væsentlig fordel ved ekstrusionsinjektoren nævnes, nemlig den, at pillens størrelse (masse) er meget veldefineret i forhold til en pille dannet ved "pipe-gun"-metoden.

På grund af den tiltagende interesse for "pipe-gun"en blev det besluttet at opbygge nogle stykker af typen med den begrundelse >>at lære og forstå at håndtere "pipe-gun"en<<.

Der blev i første omgang bygget tre styk, "pipe-gun" nr. 1, 2 og 3. Injektorerne skulle levere store piller med lav hastighed ind i et udladningskammer.

"Pipe-gun" nr. 1.

Den første "pipe-gun", "pipe-gun" nr. 1 blev bygget og afprøvet i JET-gruppen. "Pipe-gun"en bestod af et bøsseløb i rustfrit stål, hvis diameter var 3.2. mm, og afstanden mellem segmenterne var 20 mm. Segmenter, der var fremstillet i kobber, var 5 mm i tykkelse. Pillerne blev dannet ved et fødetryk på 800 mbar svarende til en temperatur på ≈ 12 K ved at sende gas ind gennem en nåleventil. Pillerne kunne skydes ud med hurtigventil ved et affyringstryk på nogle bar. Så høje affyringstryk gav for høje hastigheder p.g.a. lukning af ventilen. Pillerne kunne også skydes ud ved selvaffyring. Dette blev opnået ved at varme pillen op i så lang tid, 60-75 sekunder, at fordampet egenmateriale kun-

ne skyde pillen ud. Opvarmningen svarede til ≈ 10 K. Udskydningsmekanismen menes at være følgende: "Det fordampede pillemateriale bevæger sig i bøsse-løbet mod henholdsvis hurtigventilen og VAT-ventilen, hvorved det opvarmes. Gassen ekspanderer p.g.a. opvarmningen, og reflekteres herefter fra hurtig-ventilen (men ikke fra VAT-ventilen, da denne er åben) slående tilbage på pillen med et tryk, som er stort nok til at rive pillen løs fra bøsseløbet, inden hurtigventilen bliver aktiveret.

Ved denne form for affyring får pillerne 1) en blødere start i forhold til affyring ved hurtigventil og 2) en hermed lavere hastighed. Hastigheder på 40 m/s blev opnået ved selvaffyring. Piller af størrelsen 40 barcm^3 blev dannet.

Den lange tid før selvaffyring kunne skyldes brugen af rustfrit stål som bøsseløbmateriale.

"Pipe-gun" nr. 2.

Opbygningen af "pipe-gun" nr. 2 blev baseret på erfaringer gjort med "pipe-gun" nr. 1. En skitse af "pipe-gun" nr. 2 er vist i figur 5.6 nedenfor. Den lange regenerationstid ved "pipe-gun" nr. 1 blev afhjulpet ved at fremstille hele "pipe-gun"en i messing, da dets varmeledningsevne er omtrent 10-15 gange større end rustfrit ståls i det betragtede temperaturområde, 5-40 K. De 3 cirkulære segmenter var yderst belagt med et lag af udglødet kobber. Segmenterne var 5 mm tykke, og afstanden mellem segmenterne var 7 mm. Bøsseløbet var kort, og det havde en indre diameter på 4,5 mm. Mellem "pipe-gun" og VAT-ventil var der anvendt et rør af rustfrit stål med en indre diameter på 5 mm.

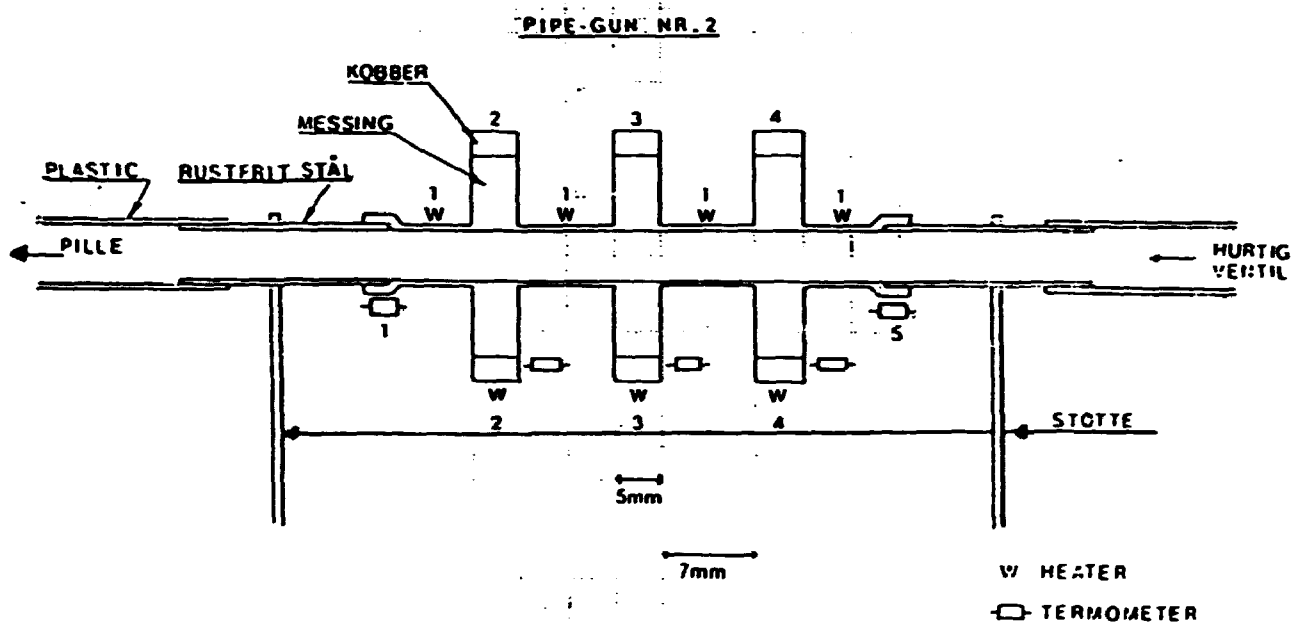
Pillens dannelsesstemperatur er en funktion af fødetryk og heaterinput. Det viste sig, at pillerne, der var dannet ved for høje temperaturer, havde en broget uhomogen overflade (struktur), og at der var tendens til fragmenter. Pillerne, der var dannet ved for lave temperaturer, var for det meste porøse.

Pillens længde afhang af fødetryk, pilledannelsesetid, heaterinput (effekt). Piller af længden 8-18 mm blev dannet. De korte og de store piller svarede til henholdsvis 100 barcm^3 og 200 barcm^3 .

Med hurtigventilaffyring blev hastigheder på mellem 65-200 m/s opnået ved affyringstryk mellem 150-1900 mbar. Ved selvaffyring med en opvarmningstid på op til 20 sekunder blev hastigheder på 150 m/s og 30 m/s opnået for henholdsvis varmt og koldt dannede piller.

Ved selvaffyring var opvarmningstiden 10-20 sekunder, og den afsatte effekt

var tilsvarende lille. Man konstaterede, at der kom et "pust" af gas over Δp -kammeret, hvor trykstigningen forårsaget af pillen og affyringsgassen blev målt (figur 5.7), før pillen ankom. Gassen stammede sandsynligvis fra for-



Figur 5.6.

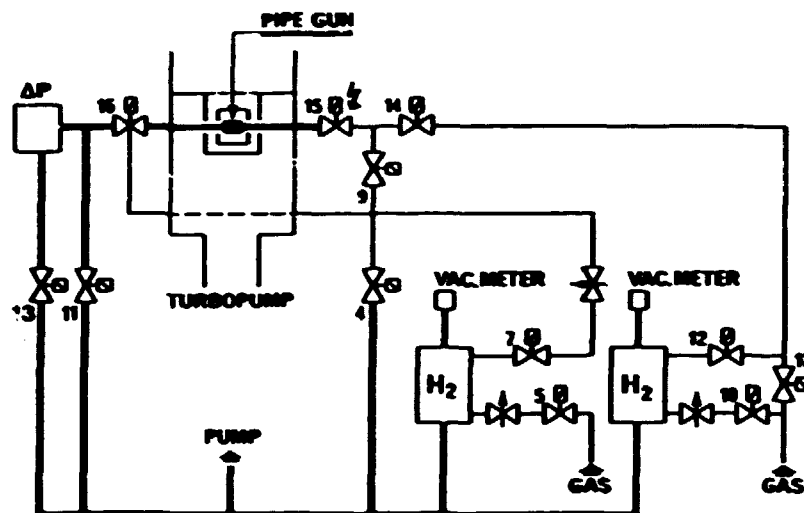
Skematisk illustration
af "pipe-gun" nr. 2.

dampet pillemateriale. Ved denne form for opvarmning blev der konstateret et tab af pillemateriale på op mod 30%. Dette skyldtes naturligvis den lange opvarmningstid. For at imødegå dette blev den lange opvarmningstid ændret til en "pulsopvarmning", hvor opvarmningstiden var op til 2 sekunder. Effekten blev tilsvarende sat op. Herefter fordampede kun ca. 2% af pillen. Den radikale formindskelse af den fordampede pillemængde skyldes, at ved "pulsopvarmning" opvarmes kun overfladen af pillen.

Flowdiagrammet, figur 5.7, illustrerer hele opstillingens rørsystem (gasfødesystem, "pipe-gun", pumpevej osv.). Ved trykmåling er ventil nr. 11 og 13 lukket, og ventil nr. 16 lukker umiddelbart efter affyringen.

"Pipe-gun" nr. 3.

Injektorenheden ved "pipe-gun" nr. 2 var koblet mekanisk til heliumbund. Koblingen mellem ydre og indre lederør skulle foretages, efter at kryostaten var



Figur 5.7.
Flowdiagram af opstillingen.

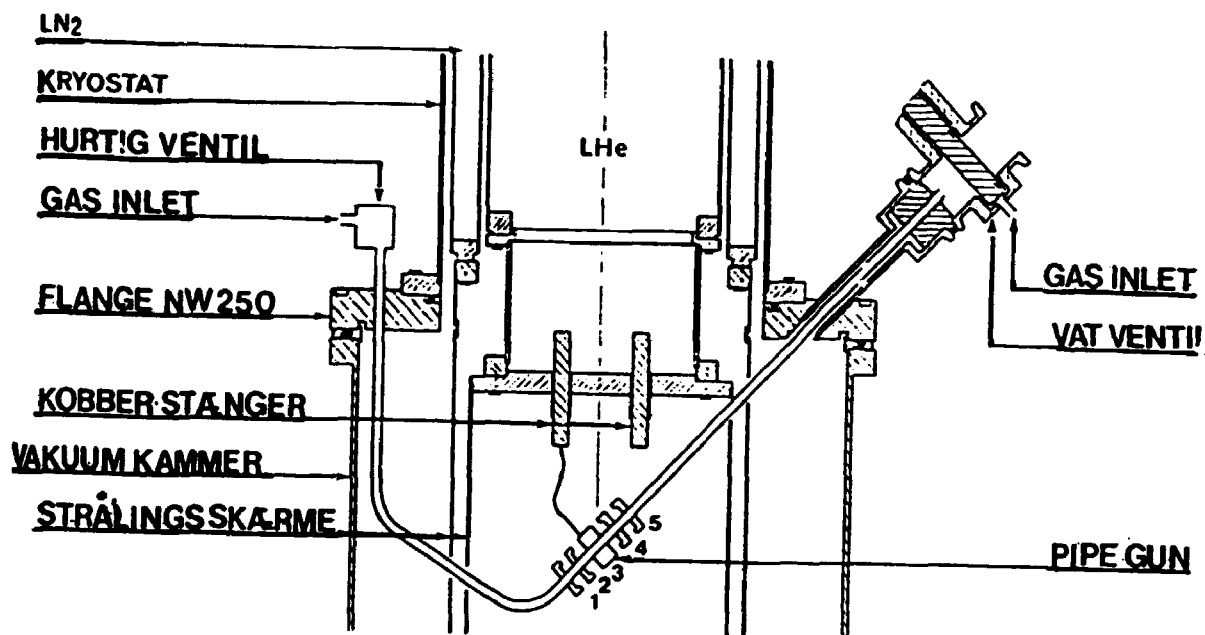
placeret på vakuumkammeret. Monteringen blev modificeret ved "pipe-gun" nr. 3, da man her koblete injektorenheden mekanisk til flangen (NW 250 figur 5.8), hvorpå kryostaten var placeret. Herved opnåede man, at koblingen kunne finde sted, før kryostaten blev placeret på vakuumkammeret. "Pipe-gun" nr. 3 med vakuumkammer er vist i figur 5.8.

"Pipe-gun" og bøsseleb var lavet af et langt messingrør, der gik fra krumningen af røret, der ledte affyringsgassen ind, og op til VAI-ventilen. Godstykkelser var 0.5 mm.

Der blev anvendt 5 segmenter af udglødet kobber, hvor centersegmentet var 10 mm bredt, og de 4 ydersegmenter var 3 mm brede. Godstykkelser af røret var reduceret til 0.25 mm mellem segmenterne. En heater var placeret på centersegmentet, og en heater blev delt henholdsvis mellem segmenterne 2 og 4 og segmenterne 1 og 5. Der blev valgt 5 segmenter, da vi ønskede at bruge de 3 inderste segmenter, 2, 3 og 4, som frysecelle, dvs. danne piller af længden 30 mm og opefter. Det viste sig dog, at segmenterne 1 og 5 var koblet for svagt, og det derfor bedre kunne betale sig at bygge en ny "pipe-gun" istedet for at foretage ændringer i indeværende "pipe-gun".

Pulsopvarmning blev stadig anvendt.

Piller af størrelsesordenen 300 barcm^3 blev dannet ved aftagende reservoir-



Figur 5.8.
"Pipe-gun" nr. 3 og
vakuumkanter.

tryk og dannelsesstemperaturen lå omkring 8 K.

Ved denne "pipe-gun" kunne man også vælge mellem hurtigventil og selvaffyring.

Selvaffyring fandt sted, når opvarmningstiden var længere end 0.5 sekunder. Hastigheder opnået ved selvaffyring lå i gennemsnit på ≈ 35 m/s med en spredning på $\pm 6\%$. Piller af størrelsesordenen 300 barcm^3 overlevede selvaffyring. Ved hurtigventilaffyring, opvarmningstid på 0.4 sekunder, med et affyringstryk på 400 mbar gik pillerne itu. Ved et lavere affyringstryk kunne pillerne ikke rives løs. Mindre piller kunne overleve de 400 mbar.

Dette kunne tyde på, at de store piller, 300 barcm^3 , blev dannet for koldt, 8 K, de var måske for porøse.

Ved at sætte fødestrykket op og pilledannelsesstiden ned, blev pillerne dannet ved en højere temperatur, 9 K.

Piller af størrelsesordenen 350 barcm^3 blev dannet. Ved selvaffyring, op-

varmningstid på 0.4 sekunder, blev der opnået hastigheder på 35 m/s i gennemsnit, en hastighed der er sammenlignelig med den hastighed koldt dannede piller opnåede i "pipe-gun" nr. 2. Ved hurtigventilaffyring med et affyringstryk på 400 mbar overlevede pillerne, og hastigheder på 60 m/s blev opnået. Dette kunne tyde på, at den højere pilledannelsestemperatur, 9 K, har haft en positiv indvirken på pillens kvalitet, den er måske ikke så porøs mere, da pillen og endda en større pille kunne overleve et affyringstryk på 400 mbar.

Den kortere tid inden selvaffyring, der optrådte ved de varmere dannede piller, skyldtes sandsynligvis, at pillen i sig selv er varmere, og der derfor skal en kortere opvarmningstid (mindre varme) til, før pillen bliver selvaffyret.

Mindre piller, 225 barcm³, kunne affyres ved 700 mbar med en opvarmningstid på 0.5 sekunder, givende hastigheder på 80 m/s. Piller på 210 barcm³ opnåede hastigheder på 140 m/s ved et affyringstryk på 1900 mbar. Pillens længde kunne variere mellem en faktor 1.6 og 2.0 af centersegmentets længde.

Delayet for alle pillestørrelser lå mellem 6-8 ms.

Pillestørrelser mellem 100 barcm³ og 350 barcm³ blev dannet, og hastighederne for henholdsvis selv- og hurtigventilaffyring lå mellem 35-150 m/s og 60-200 m/s. Affyringsdelayet lå mellem 6-8 ms. Piller dannet ved 8-9 K var af bedst kvalitet.

Vores første erfaringer og resultater med "pipe-gun"en er blevet præsenteret i indeværende kapitel.

Tabel 1

Opsummering.

	Pipe-gun nr. 1	Pipe-gun nr. 2	Pipe-gun nr. 3
Bøsseløb	Rustfrit stål 3.2 mm i.d. ≈ 70 mm lang	Messing 4.5 mm i.d. 50 mm lang	Messing 5 mm i.d. ≈ 70 mm lang
Segmenter	Kobber 3 styk	Messing + kobber 3 styk 5 ₇ 5 ₇ 5	Messing + kobber 5 styk 3 ₇ 3 ₇ 10 ₇ 3 ₇ 3
P _{føde}	800 mbar	500-1000 mbar	600-950 mbar
Pillelængde		8-18 mm	10-20 mm
Hastighed (selvaffyring)	≈ 40 m/s	30-150 m/s	30-40 m/s
P _{affyring}	≈ 2 bar	150-200/ 300-1900 mbar	400-1900 mbar
Hastighed (hurtigventil)		65-70/100-200 m/s	60-200 m/s
Pillestørrelse	40 barcm ³ (2 l reservoir)	100-250 barcm ³ (2 l reservoir)	200-350 barcm ³ (2 l reservoir)
Dannelses- temperatur.	12 K	8-9 K	8-9 K

KAPITEL 6

"Pipe-gun" til piller med høj hastighed.

En "pipe-gun" bestemt til små hurtige, 900-1200 m/s, piller blev opbygget. Pillediameteren skulle være 2 mm. Med et ønske om et længde-diameter-forhold på 1.5-2.0 svarede dette til en pillelængde på 3-4 mm, altså pillerne af størrelsesordenen $9-12.5 \text{ barcm}^3$. JET-pillerne omtalt i kapitel 5 var en faktor 10-30 større. Pillehastigheden svarer til hastigheder opnået med andre pneumatiske pilleinjektorer.

I første omgang var det meningen at bygge en 1-skudsinjektor med de ovennævnte dimensioner på pillerne. Derefter var det meningen at udbygge den til en 3-skudsinjektor med samme pilledimension. Erfaringerne i forbindelse med 1-skudsinjektoren skulle bruges ved 3-skudsinjektoren.

I første omgang blev bøsseløbet fremstillet i messing. Det viste sig, at pilledannelsen var svær at styre, da temperaturgradienterne var svære at styre. Dette skyldes messings relativt gode ledningsevne. Problemet blev løst ved i stedet at fremstille bøsseløbet i rustfrit stål, da dets varmeledningsevne er en faktor 10-15 mindre end messing i det betragtede temperaturområde, 5-40 K. Styling af pilledannelsen (temperaturgradienten) er af stor betydning ved de små piller, da pillens størrelse bør være veldefineret, hvor imod ved de store piller var pilledannelsen (-størrelsen) ikke så afgørende, da pillerne skulle være så store som muligt. Pillens relative længde (volumen-) forøgelse er væsentligt større ved de små piller end ved de store piller for given placering af kondensationspunktet mellem segmenterne.

En skitse af temperaturgradienterne for rustfrit stål og messing er vist i figur 6.1. Som man bemærker i figur 6.1, vil pillen for given temperatur (effekt) på ydersegmentet for messings vedkommende være længere end for rustfrit ståls vedkommende.

Man kan altså styre temperaturgradienten og herved pillens længde bedre, hvis man anvender et materiale som rustfrit stål.

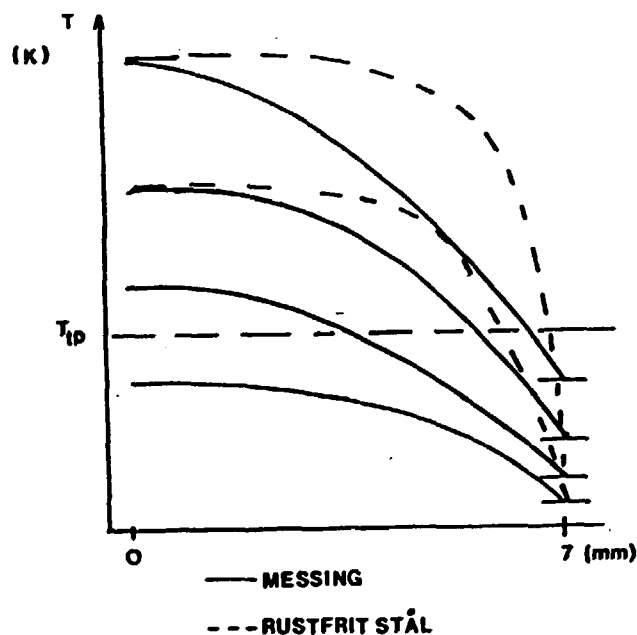
"Pipe-gun"ens dimensioner var som givet nedenfor:

bøsseløb af rustfrit stål
længde af "pipe-gun": 36 mm
indre diameter af "pipe-gun": 2.0 mm

segmenter: 3 styk (udglødet kobber)

2₇2₇2

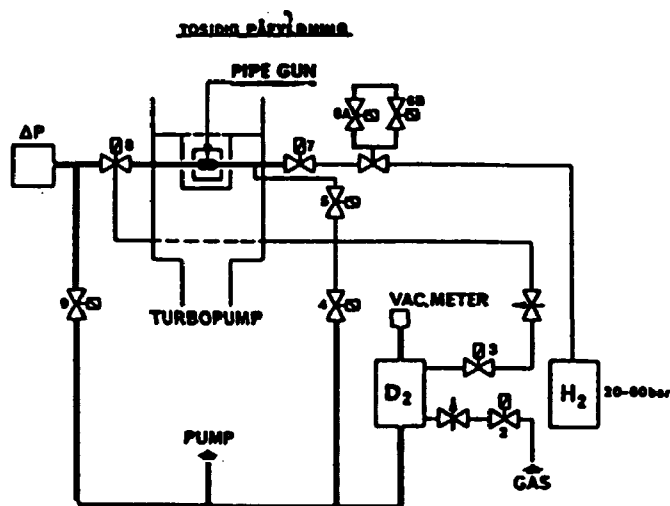
"Pipe-gun"en, hvis godstykkelser var 0.3 mm, var loddet sammen med bøsse-løbene af rustfrit stål fortil og bagtil, hvis dimensioner var:
bagtil (mellem hurtigventil og "pipe-gun"): 100 mm, i.d. 2.0 mm
fortil (mellem VAT-ventil og "pipe-gun"): 285 mm, i.d. 2.0 mm.



Figur 6.1.

Illustration af temperatur-
gradienterne for henholdsvis rustfrit
stål (stiplede) og messing (fuldt optrukne).

Den høje pillehastighed kræver et højt affyringstryk, 30-50 bar.
Opstillingens flowdiagram er vist skematisk i figur 6.2.



Figur 6.2
Flowdiagram for opstillingen.

Hurtigventilen var af den kommercielle type Skinner. Flowvejen i hurtigventilen har et udseende som en firkantpuls, hvilket indikerer en meget knudret vej; vejen virker næsten som en flowmodstand. Der blev foretaget ændringer i hurtigventilen for at forbedre flowvejen og hermed affyringstrykket. Da affyringstrykket er med til at holde ventilen lukket, skal der en større magnetiseringsstrøm til for at åbne ventilen ved et højere affyringstryk. Et yderligere problem var, at der strømmer for meget affyringsgas ud gennem ventilen, imens denne er åben. Forskellige bestræbelser på at formindske gasmængden finder sted i sektionen.

Følgende føde- og affyringstryk blev anvendt:

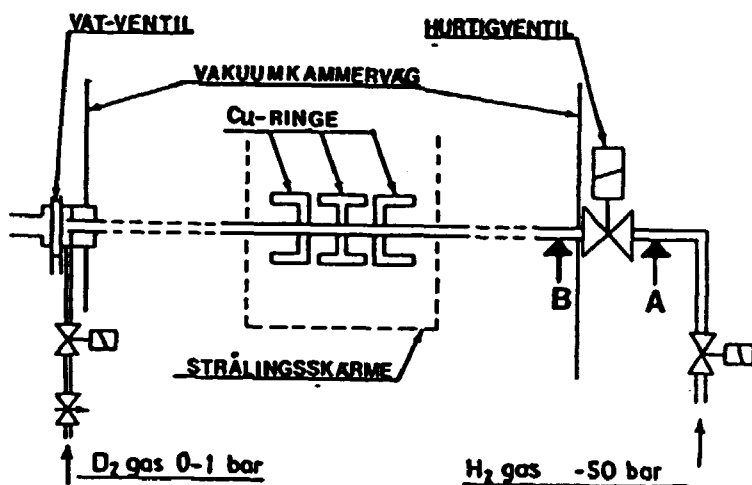
$$P_{\text{føde}}: 200-500 \text{ mbær} \quad P_{\text{aff}}: 30-50 \text{ bar.}$$

og følgende resultater blev opnået:

$$V_{\text{pille}}: 900-1100 \text{ m/s} \quad L_{\text{pille}}: 2-4 \text{ mm.}$$

De små piller blev dannet "tosidet" ved at lede gas ind gennem henholdsvis VAI-ventilen og et lille tyndt rør, der var loddet fast på bøsselebet, punkt B i figur 6.3. Dette lægger en restriktion på bøsselegets mindste/nedre dimension. Røret ved punkt B skulle have et meget mindre tværsnit end bøsse-

løbet for ikke at påvirke affyringstrykket. Endvidere skulle ventilen (v.5 i figur 6.4a), der var placeret i starten af det tynde rør, lukke mod to trykveje, den ene trykvej endda mod højtryk (Se figur 6.2.).



Figur 6.3.

Skematisk tegning af
Risø "pipe-gun"en.

Punktet A i figur 6.3 indikerer, hvor gassen blev ledt ind fra den ene side ved dannelsen af JET-pillerne.

I bilag 1 er vist beregnede kurver, der viser temperaturvariationen mellem centersegmentet og et af ydersegmenterne (afstand 7 mm), temperaturgradienten, for forskellige temperaturer (effekt) på ydersegmentet, og i bilag 2 er vist damptrykkurver for flydende og fast hydrogen og dets isotoper. Triplepunkttemperaturen for normal deuterium er vist. Triplepunkttemperaturen, der er 18.7 K, svarer til et tryk på 171 mbar (triplepunkttrykket). Det er antaget, at centersegmentets temperatur er 3 K. Som man ser, vil pillen ved en temperatur på 40 K på ydersegmentet strække sig 1.15 mm ud over centersegmentet (triplepunktets beliggenhed) når (damp-)fødetrykket er 171 mbar. Ved en lavere temperatur på ydersegmentet, 25 K, vil triplepunktet ligge længere væk fra centersegmentet, 3.5 mm, og pillen vil strække sig det længere ud over centersegmentet, 3.5 mm. Sænker man (damp-)fødetrykket, vil gassen kondensere ved en lavere temperatur, da gassen kun kan kondensere op til den temperatur, der

svarer til (føde-)damptrykket. Er (damp-)fødetrykket eksempelvis 6.5 mbar, er temperaturen 14.1 K (bilag 2). Denne temperatur svarer til, at pillen strækker sig 0.53 mm og 1.47 mm ud over centersegmentet ved en temperatur på henholdsvis 40 K og 25 K på ydersegmentet.

Derfor er det muligt at ændre pillens længde ved at ændre fødetryk og temperaturgradient: temperaturgradienten fastlægger triplepunktets beliggenhed i bøsselfødet, og (damp-)fødetrykket definerer herefter pillens udstrækning indenfor dette område i bøsselfødet.

Om pillerne vil kunne overleve affyringstrykket og transporten, afhænger af deres kvalitet. Kvaliteten afhænger tildels af fødetrykket. Ved et højt (damp-)fødetryk vil pillen, som det blev antydnet ovenfor, strække sig længere ud over centersegmentet end hvis (damp-)fødetrykket var mindre. Den del af pillen, der befinder sig udenfor centersegmentet, vil være dannet ved en højere temperatur, end den del af pillen, der befinder sig indenfor centersegmentet. Altså vil konsistensen ændre sig ud igennem pillen. Dette resulterer i en uhomogen eller kvalitetsmæssig dårligere pille. Man bør da få en (mere) homogen pille ved kun at danne den indenfor centersegmentet, det vil sige ved et lavt (damp-)fødetryk.

Altså bør pillens kvalitet afhænge af fødetrykket/pilledannelsestemperaturen. Det viste sig, at blev pillen dannet ved for lav(t) temperatur (tryk), gik den itu. Dette var nok at henregne til en form for porøsitet i pillen. Blev pillen dannet ved for høj(t) temperatur (tryk), gik den også itu. Dette var nok at henregne til en vis form for uhomogenitet i pillen. En dannelses-temperatur på ≈ 8.5 K viste sig at være mest ideel.

Altså bør man danne pillen ved et relativt lavt (damp-)fødetryk.

Resultatet/konklusionen bliver indirekte støttet af den kendsgerning, at franskmændene og amerikanerne danner deres piller ved et lavt fødetryk, ≈ 1 torr.

Indtil nu er pillerne blevet dannet "tosidet" ved at lede gas gennem VAT-ventilen og røret placeret ved punkt B i figur 6.3.

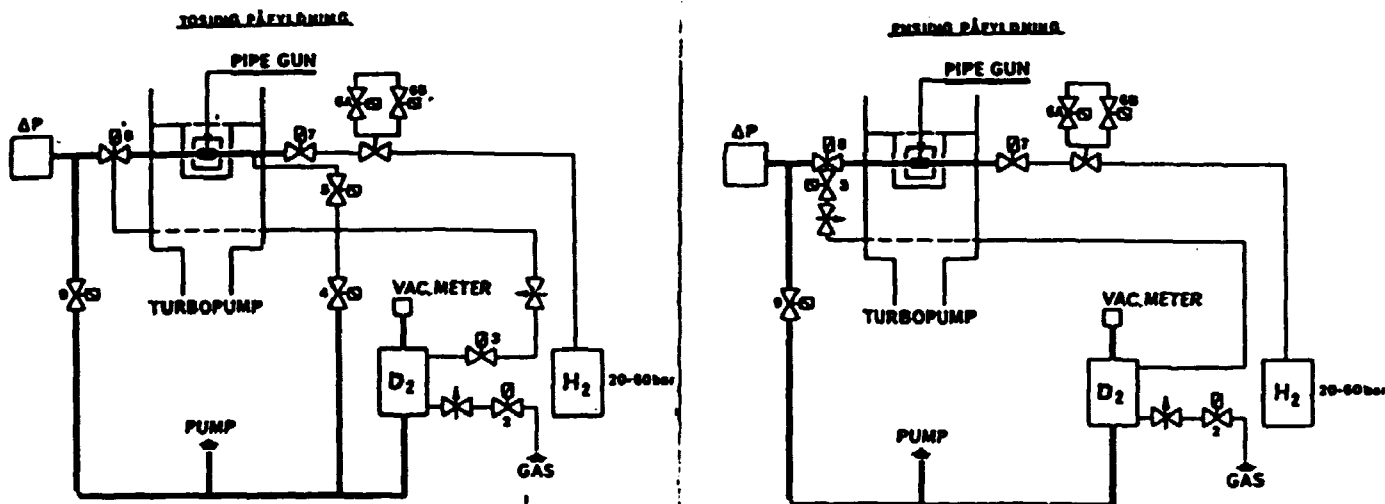
Ensidet pilledannelse.

At danne pillen "ensidet" har flere umiddelbare fordele. Man undgår dels det tynde rør ved punkt B, dels ventil 5 (v.5), der skulle kunne lukke med to tryk-

veje.

Ved "ensidet" pilledannelse bliver gassen kun ledt ind gennem VAT-ventilen.

Figur 6.4. viser flowdiagrammerne for henholdsvis "ensidet" og "tosidet" gaspåfyldning. Som man bemærker, er ventiler nr. 4 og 5 fjernet ved "ensidet" gaspåfyldning.



Figur 6.4.

(a) flowdiagram for "tosidet" gaspåfyldning

(b) flowdiagram for "ensidet" gaspåfyldning.

Pilledannelsesprocessen ved "ensidet" gaspåfyldning.

Hvorledes pillen bliver dannet ved den "tosidede" gaspåfyldning blev vist skematisk i kapitel 5 (figur 5.3). Den skitserede dannelsesprocedure skal naturligvis forstås meget stilistisk. Det er en generelt accepteret måde at beskrive pilledannelsesprocessen på. Hvorledes pillen bliver dannet ved "ensidet" gaspåfyldning, er der ikke blevet gisnet om tidligere, da ingen har forsøgt dette før.

De første piller blev dannet ved et relativt højt fødetryk og en hermed høj dannelsesstemperatur. Pillerne gik itu ved et affyringstryk på 30 bar. Det var nok primært at henregne til den høje dannelsesstemperatur og en heraf følgende uhomogenitet i pillen. Pillerne overlevede, hvis man lod dem køle lidt længere tid. Man bør nemlig erindre, at termometret viser temperaturen af segmentet

og ikke af pillen eller bøsselføbet, hvor pillen dannes/sidder; så selv om termometret er "tilbage" i temperatur, behøver pillen ikke at være det. Efter den yderligere køling var pillerne hele.

Resultaterne var følgende:

$$P_{\text{føde}}: 30-40 \text{ mbar} \quad P_{\text{aff}}: 30 \text{ bar} \quad V_{\text{pille}}: \approx 900 \text{ m/s}$$

Pillen ville nok ikke have overlevet et højere affyringstryk, ≈ 70 bar, p.g.a. uhomogenitet og en eventuel asymmetrisk (yderligere uhomogenitet) pille (se nedenfor).

Endvidere er det også et spørgsmål om, hvor hurtigt pillen bliver dannet. Man kunne godt tænke sig, at der hurtigt blev dannet en "væg" af fast deuterium i midten af centersegmentet ved det høje fødetryk, således at efterfølgende gas kun kan kondensere fortil på pillen, asymmetrisk pille (-dannelse). Bagtil vil pillen bestå dels af allerede kondenseret gas, dels af gas der står i den bageste del af bøsselføbet, efter "væggen" er dannet.

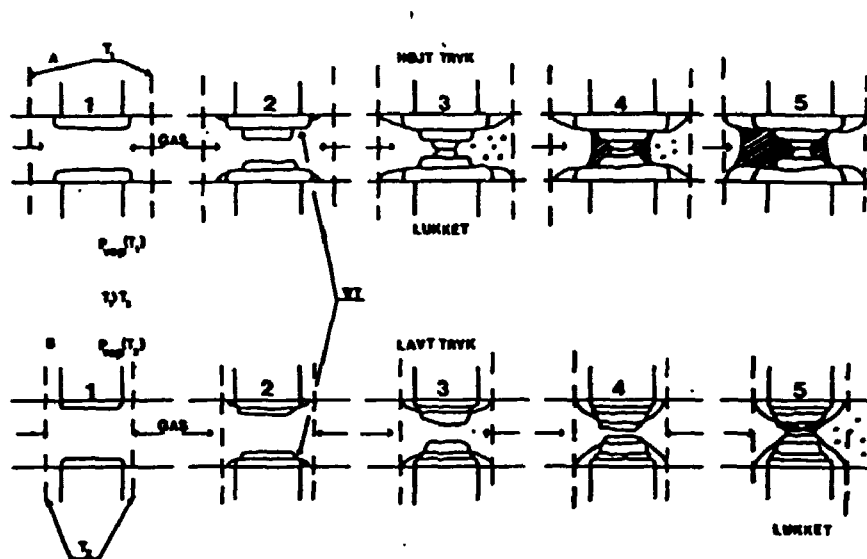
Mekanismen, der kan forklare (den hurtige) dannelse af en "væg" af fast deuterium ved et højt fødetryk, kunne være som beskrevet og illustreret i figur 6.5. nedenfor.

Ved det høje fødetryk er den afsatte energi stor, på grund af det større antal gaspartikler, der ankommer ved centersegmentet. Den afsatte effekt vil skabe en temperaturgradient på den allerede kondenserede gas. Temperaturgradienten vil være så stor, at gassen, der ankommer derefter, vil kondensere et pænt stykke inde på den allerede kondenserede gas (6.5(a2)+(a3)). Resultatet bliver, at gassen kondenserer trinvis længere og længere inde, samt ved højere og højere temperatur, hvorved pillen "lukker" hurtigt (6.5(a3)). Pillemateriale vil ikke være uniformt. Pillen får herved et udbredt konisk udseende i enderne. Den hurtige "lukning" bevirker, at den efterfølgende gas kun kan kondensere på den ene side af pillen.

Dette giver en asymmetrisk pille(-dannelse).

Ved et lavere fødetryk (6.5(b)) vil den skabte temperaturgradient være mindre, hvorved kondenseringen af gassen starter længere ude på den allerede kondenserede gas (6.5(b2+b3+b4)), end det var tilfældet ved det højere tryk. Det vil sige, at pillen "lukker" meget senere (6.5(b5)) eller slet ikke. Herved vil gassen hele tiden kunne kondensere på begge sider af pillen, da gas-

sen kan strømme igennem pillen. Den koniske form i enderne vil ikke være nær så udbredt som i højtryktilfældet. Pillen vil være symmetrisk (dannet).



Figur 6.5.

Pilledannelseproces ved
henholdsvis lavt og højt tryk.

(a): højt tryk, (b): lavt tryk.

Så for at undgå dels de uhomogene og derved kvalitetsmæssigt mindre gode piller, dels den asymmetriske pille (-dannelse) p.g.a. den hurtige "væg-dannelse af fast deuterium, bør man danne pillerne ved et lavt fødetryk.

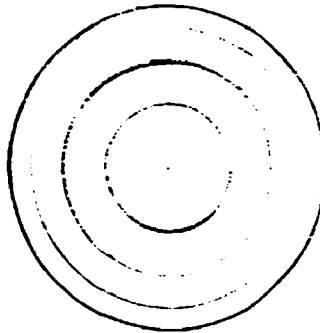
Mekanismen beskrevet ovenfor gælder også for "tosidet" pilledannelse.

Ser man pillen bagfra, vil den have en temperaturfordeling, der har samme udseende som årringene i et træ (se nedenfor).

Pillen vil have en højere temperatur i midten end ude i siden; altså eksisterer der en temperaturgradient inden i pillen. Temperaturgradienten er større for højere fødetryk. Pillen vil være meget blød i midten, hvorfor affyrings-trykket ville være istand til at blæse den del af pillen ud. Mange af vores piller havde faktisk et hul i midten, hvilket kunne tyde på rigtigheden af den plausible forklaring ovenfor.

Ved følgende indstillinger fik vi meget pæne hele piller:

$P_{\text{føde}}$: 20-10 og 4 mbar
 P_{aff} : 40 bar
 W_1, W_2 : 40-50 mA, stærke temperaturgradienter
 W_2 : 7-10 mA



Figur 6.6.
Pillen set forfra eller bagfra
med given temperaturfordeling.

At centersegmentet er opvarmet skyldes, at det kunne tænkes, at pillen smelter bedre sammen under dannelsen. Dannelsestemperaturen, ≈ 8.5 K (≈ 280 -300 ohm), var sammensat af fødetryk og effekten afsat ved centersegmentet (W_2).

Da den "ensidede pilledannelse resulterer i en simplificering af opbygningen af pilleinjektoren, vil dette resultere i en billigere pilleinjektor.

Konklusion.

En egentlig diskussion vil ikke finde sted, da jeg har bestræbt mig på, at diskutere de forskellige ting i de respektive kapitler. I kapitel 3 er der en udtømmende diskussionsdel sidst i kapitlet, der munder ud i adskillige anbefalinger. Kapitel 4 kræver ingen nærmere diskussion, da dette skal ses som en udvidelse af kapitel 3. I kapitel 5 og 6, der omhandler "pipe-gun"en, er der også løbende blevet diskuteret og draget konklusioner.

Man bør dog nok knytte nogle generelle bemærkninger ud fra rapportens indhold.

Ekstrusionsinjektoren har indtil for et par år siden været en af de mest anvendte injektortyper. En injektortype der opfyldte alle krav. Nødvendigheden af de mekanisk bevægelige dele i den kryogene enhed er ikke ønskværdig, når man begynder at injicere piller af tritium. Da injektion af tritiumpiller bliver aktuel indenfor de næste 10 år, vil en injektortype, der kan håndtere tritiumpiller uden nogen form for risiko, blive en nødvendighed. "Pipe-gun"en er netop en injektortype, der kan håndtere tritiumpiller med meget lille risiko, da 1) der ikke er nogen bevægelige dele i den kryogene enhed, 2) der er minimalt tritiumtab og 3) operationen af den er simpel og 4) ingen spild af kryopumpet materiale.

På grund af "pipe-gun"ens fordele må man nok drage den konklusion, at ekstrusionsinjektoren ikke har nogen fremtid. Derfor bør man satse på "pipe-gun"en, hvis man vil være med i udviklingen samt have sin andel af brintpilleinjektormarkedet. Ekstrusionsinjektoren vil dog stadig kunne anvendes ved injektion af deuterium- og brintpiller.

Litteraturliste.

- W. Amenda and R.S. Lang, Cryogenics July 1982
- W. Amenda and R.S. Lang, J. Phys. E: Sci. Instrum. 19(1986).
- S.A. Andersen, 13'th SOFT Varese september 1984
- V. Andersen et al., 11th SOFT Oxford 15-19 september, 1980.
- S.K. Combs et al., Nuclear Technology/Fusion, vol. 4 september 1983, p. 666.
- S.K. Combs et al., Rev. Sci.Instrum. 56(6), pp. 1173-1178, June 1985.
- S.K. Combs et al., J.Vac.Sci.Technol. A4(3), pp. 1113-1117, May/June 1986
- S.K. Combs et al., Rev.Sci.Instrum. 57(10), pp. 2636-2637, October 1986.
- S.K. Combs and S.L. Milora, 14'th SOFT, Avignon, France 8-12 September 1986.
- S.K. Combs et al., 14'th SOFT, Avignon, France 8-12 September, 1986.
- C.A. Foster et al., Rev.Sci.Instrum. vol. 48, no. 6, June 1977.
- C.A. Foster et al., Nuclear Fusion, p. 1067-1075, 1977.
- C.A. Foster and S.L. Milora, pellet acc. program in Proc. Fusion Fueling Workshop, N.Y. (1978), p. 117.
- (C.A. Foster and S.L. Milora, Bull. Am. Phys. Soc. 23, p. 790, 1978).
- C.A. Foster, J. Vac.Sci. Technol. A 1 (2), p. 952-958, April-June 1983.
- G. Francis et al., Phys. Letters 25 a pp. 486-7, 1967.
- M. Greenwald et al., Phys.Rev. Lett. 23 July, p. 352, 1983.
- R.S. Hawke, J.Vac.Sci. Technol. A 1 (2), pp. 969-973, April-June 1983.
- IAEA (International Atomic Energy Agency): World survey of major activities in Controlled Fusion Research, 1982 Edition.
- t.R. Jarboe and W.R. Baker, Rev. Sci. Instrum. vol. 45, no. 3, pp. 431-33, March 1974.
- P.B. Jensen and V. Andersen, Risø-M-2294, R.N.L. 1981.
- L.W. Jørgensen et al., Plasma Physics vol. 17, pp. 453-461, 1975.
- J. Lafferranderie et al., International pellet fueling workshop, La Jolla, California USA, 30 October-3 November 1985.
- J. Lafferranderie et al., 14'th SOFT, Avignon, France 8-12 september 1986.
- Max Plank Institut für Plasmaphysik Annual report 1978.
- S.L. Milora et al., Phys. Rev. Letters vol. 42, no. 2, p. 97, 1979 (A).
- S.L. Milora and C.A. Foster, Rev. Sci. Instrum. 50(4), p. 482, April 1979(B).
- S.L. Milora, J. Fus. Energy vol. 1, no. 1, 1981.
- A. Nordskov et al., Risø-M-2245 R.N.L. 1980.
- (Physics Department Annual Progress Report 1978).

John F.O'Hanlon: A User's Guide to Vacuum Technology; Wiley-Interscience Publication, 1980.

S.C. Rashleigh and R.A. Marshall, J. Appl. Phys. 49(4), pp. 2540-2542, April 1978.

H.M. Roder, G.E. Childs, R.D. McCarty, P.E. Angerhofer: Survey of the Properties of the Hydrogen Isotopes below their critical Temperatures; Cryogenics Division National Bureau of Standards. 1973.

D.D. Schuresko et al., J.Vac. Technol. A 1 (2), pp. 959-963, April-June 1983.

L. Spitzer, D.J. Grove, W.E. Johnson, L.Tonks and W.R. Westendorp, "Problems of the Stellerator as a useful Power source, USAEC Report NYO-6047 (1954).

H. Sørensen et al., 12th SOFT Julich 13-17 September, 1982.

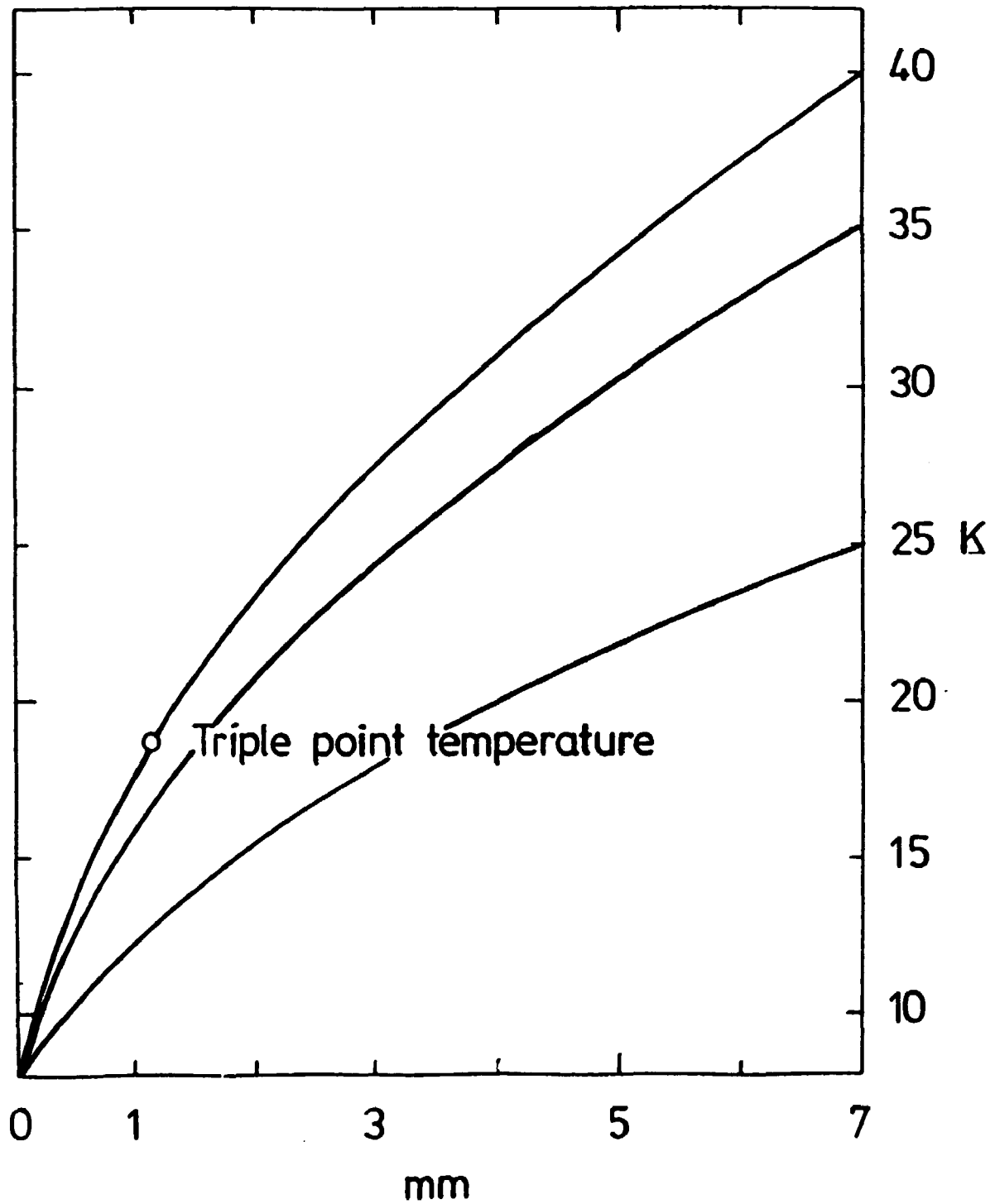
H. Sørensen et al., Fusion Technology vol. 6 September 1984, p. 378.

H. Sørensen, A. Nordskov, B. Sass, T. Visler, Ass. Euratom-Risø Laboratory, to be published in Rev. Sci. Instrum.

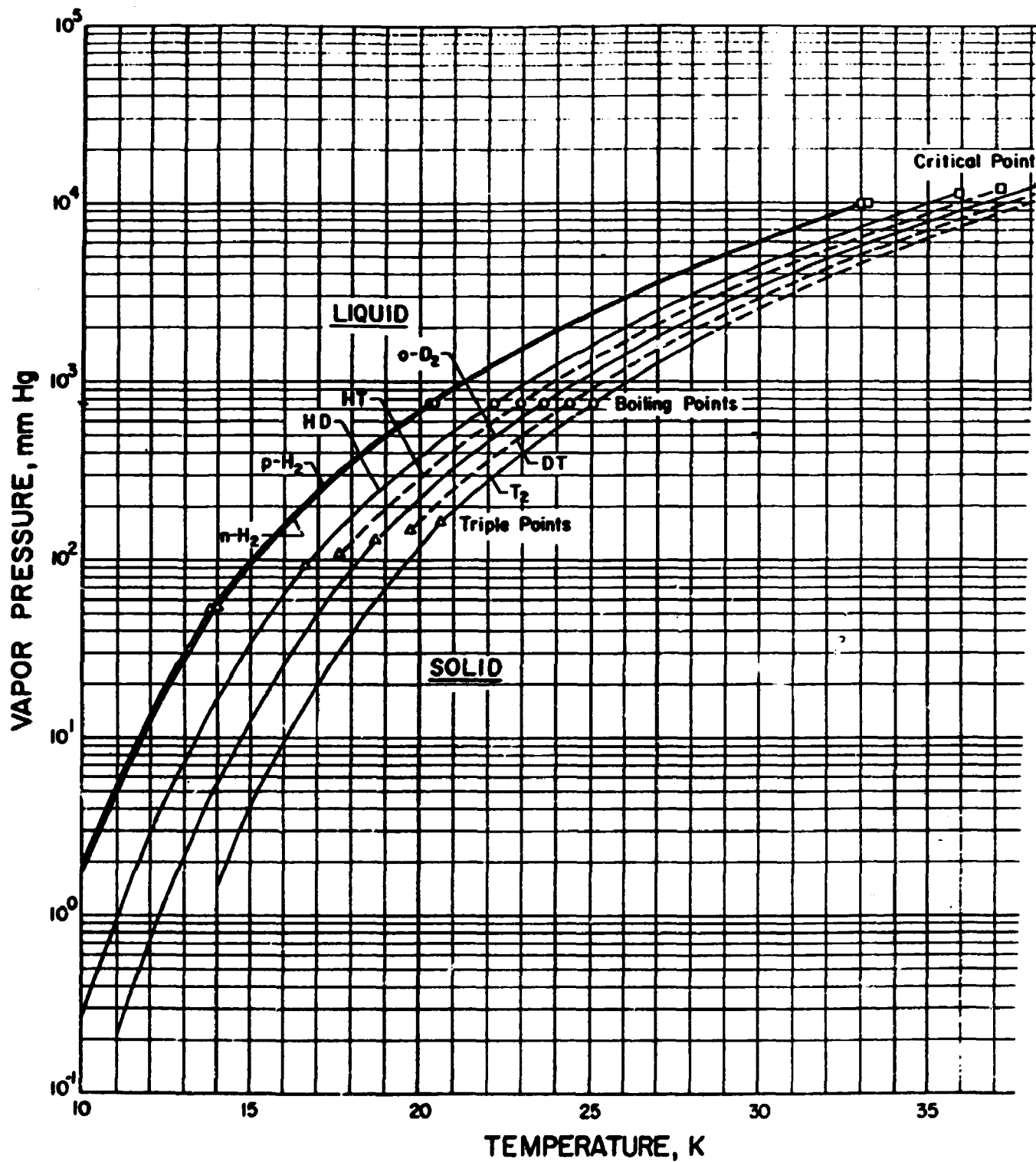
A.F.D.S. Taylor, J.Sci. Instrum. Series 2, 2, p. 696, 1969.

Thermal conductivity of metal and alloys at low temperatures, A review of the literature; National Bureau of Standards, NBS circular 586.

B I L A G



Temperaturvariationen mellem centersegmentet og
 en af de ydre segmenter for rustfrit stål.
 Triplepunkttemperaturen for deuterium er vist.



Damptrykcurver for fast og flydende hydrogen og dets isotoper.

References; H.M.Roder et al.: Survey of the properties of the Hydrogen Isotopes below their critical Temperatures.

Bilag 3

Kommentarer til omstående liste.

En egentlig markedsundersøgelse har ikke fundet sted. Der er lavet en undersøgelse baseret på bogen udgivet af IAEA (International Atomic Energy Agency): World survey of major activities in Controlled Fusion Research, 1982, der er en oversigt over igangværende aktiviteter inden for fusionsforskningen.

Det, vi har gjort, er, at udtage de maskiner der kunne have interesse mht. pilleinjektion, og herefter rubricere maskinerne efter maskintype. Under maskintypen er maskinerne rubriceret efter, hvilket land de er opstillet i.

Oven nævnte IAEA publikation må nu betragtes som stærkt forældet. I mellemtiden er der startet flere eksperimenter (maskiner) op rundt om i verden, som naturligvis ikke kan være opført i publikationen. Derfor er listen ufuldstændig.

Efter præsentationen af maskiner af interesse er forespørgelser fra forskellige lande til Risø plasmafysiksektion præsenteret. Dette kunne tyde på en interesse for pilleinjektion. Endvidere er det en udbredt opfattelse, at pilleinjektormarkedet er voksende for tiden p.g.a. vellykkede/gunstige forsøg med pilleinjektion.

Liste over Tokamaks, Stellaratorer og RFP'er der evt. kunne have
interesse med henblik på salg af brintpilleinjektorer.

Listen over igangværende aktiviteter er taget fra bogen "WORLD
SURVEY OF MAJOR ACTIVITIES IN CONTROLLED FUSION RESEARCH" 1982
EDITION, IAEA 1982.

Tokamaks.

LAND	a (m)	R (m)	V _p (m ³)
<hr/>			
Australien			
LT-4 (Canberra (ANU))	0.14	0.5	0.1
TORTUS (Sydney (SYD))	0.12	0.44	0.13
Belgien			
ERASMUS (Brussels)	0.195	0.5	0.375
Braeilien			
TBR (San Paulo)	0.11	0.3	0.07
Kanada			
TOKAMAK DE	0.27	0.84	≈1.2
VARENNES (Hydro-Quebec)			
STOR-M (Saskatchewan)	0.14	0.46	0.18
Kina			
2 unavngivne laboratorier.			

EF

*JET	1.25	2.96	≤170.
------	------	------	-------

Frankrig

PETULA B(Grenoble)	0.18	0.72	0.5
WEGA(Grenoble)	0.15	0.72	0.4
*TORE SUPRA	0.7	2.25	25.0

Vesttyskland

*ASDEX	0.40	1.65	5.2
*ASDEX	0.5	1.65	
UPGRADE			
TEXTOR(jülich)	0.5	1.75	8.6
UNITOR(jülich)	0.1	0.3	0.6

Italien

FT(Frascati)	0.23	0.83	0.65
FTU(Frascati)	0.31	0.92	1.6
THOR(Milano)	0.17	0.52	0.3

Japan

HT-1(Hitachi)	0.070/0.135	0.35	0.12
JFT-2(JAERI)	0.28	0.9	1.0
JTF-2M(ditto)	0.5x0.3	1.3	4.0
JT-60(ditto)	0.95	3.03	54.0
D-III(ditto)	0.45x0.70	1.43	9.0
NOVA II(Kyoto U)	0.06	0.3	0.0034
WT-II(ditto)	0.09	0.40	0.064
TRIAM-1 M(Kyushu U)	0.12x0.18	0.8	0.358
HYBTOK-1(Nagoya U)	0.1	0.3	0.033
CSTN-II(ditto)	0.09	0.4	0.064

R-TOKAMAK (ditto)	0.6	2.1	15.0
JIPP T-II (ditto)	0.23	0.91	1.0
JIPP T-II (ditto)	0.16	0.91	0.5
TNT-A (Tokyo U)	0.09x0.11	0.4	0.073

Holland

TORTUR II (FOM Jutphaas)	0.09	0.46	0.073
RINGBOOG II (ditto)	0.08	0.56	0.062

Spanien

TJ-1, JEN-1	0.10	0.30	0.059
-------------	------	------	-------

Sweitz

TCA (Lausanne)	0.18	0.60	0.38
----------------	------	------	------

England

DITE (Cullham)	0.26	1.17	
TOSCA (ditto)	0.09	0.3	1.0

USA

APEX	0.145	0.515	0.4
TEXT	0.28	1.0	1.5
PRETEXT	0.15	0.53	0.25
U.C.I TOKAMAK	0.15	0.6	0.2
*ALCATOR C (injektion)	0.16	0.64	0.32
VERSATOR	0.13	0.40	0.13
PLT	0.4	1.32	4.2
PDX	0.38	1.38	3.9
*TFTR (injektion)	0.85	2.48	35.0
RENTOR	0.15	0.45	0.2
TOKAPOLE II	0.22	0.5	0.6

USSR

TUMAN 3(injektion)	0.23	0.55	0.6
TUMAN 2A	0.08	0.4	0.06
FT-1(injektion)	0.15	0.62	0.28
FT-2(injektion)	0.10	0.55	0.10
R-05	0.1	0.65	0.13
TM-4	0.085	0.53	0.075
T-10(injektion)			

Stellaratorer.

Vesttyskland

Wendelstein	0.13	0.2	0.35
VII A			
Wendelstein	0.2	2.0	1.2
VII AS			

Japan

Heliotron-E	0.2	2.2	1.7
Heliotron-DM	0.04	0.45	0.014
Heliotron-D	0.01	1.085	0.2

England

CLEO	0.13	0.9	0.2
------	------	-----	-----

USA

Ultimak	0.16	0.58	0.1
ATF-1	0.25	2.0	2.5
WISTOR-U	0.35	2.56	6.0

RFP.

(eller længde)

Argentina

FAST LINEAR	0.08	0.3	0.06
teta-PINCH(Comision Nacional)			

Brasilien

teta-PINCH(Campinas)		1.0	0.02
----------------------	--	-----	------

Vesttyskland

DYNAMIC	0.01	L=0.6	
Z-PINCH(SFB 162)			
LINEAR	0.01	L=0.6	
Z-PINCH(ditto)			
HECTOR	a=0.1	0.3	0.4
BELT-PINCH(Stuttgart) b=0.55			

Italien

*ETA-BETA	0.125	0.65	0.2
Reversed Pinch(Padua)			
RFX	0.6	1.8	6.0
Reversed Pinch(Padua)			

Japan

TPE-2	0.14x0.22	0.4	0.06
SCREW-PINCH(Electrotec. Lab)			
TPE-IRM	0.09	0.5	0.08
Reversed Pinch(ditto)			
STP-3	0.125	0.485	0.15

SLOW SCREW PINCH(Nagoya U)

MBT	0.08	1.5	0.19
-----	------	-----	------

1/4 TORUS

HIGH beta

STELLARATOR(Nihon U)

Holland

SPICA II	b/a=0.34/0.15	0.45	0.5
----------	---------------	------	-----

(FOM Jutphaas)

England

HBTXIA	0.26	0.8	0.5
--------	------	-----	-----

Reversed Pinch

CLED	0.13	0.9	0.2
------	------	-----	-----

Reversed Pinch

USA

ZT-40M	0.2	1.14	0.8
--------	-----	------	-----

Reversed Pinch(LANL)

HIGH beta	0.06	L=3.0	0.1
-----------	------	-------	-----

LINEAR teta-

PINCH(Washington(UWFPP))

*: allerede fungerende ordninger angående pilleinjektion.

Forespørgelser.

Kina:

Ved besøg i Kina viste der sig interesse for pilleinjektion ved 2 laboratorier. En generel interesse for injektion. Evt.

nærmere samarbejde.

Italien:

Installeret injektor ved ETA-BETA II (reversed pinch) i Padova. Mulighed for levering af injektor ved RFX. Nærmere samtale vedrørende dette i '87.

Forespørgelse om piller fra Frascati i September '86.

Foreslag om at sende folk herop til oplæring fra Frascati og Ispra (Cascini).

Japan:

Ved besøg i Japan sås injektorer, disse imponerede ikke. Interesse blev udvist, da de fik at vide, at man lavede injektorer ved Riso.

Schweitz:

Forespørgelse i 1984 om piller til lille tokamak i Lausanne.

Spanien:

Interesse for pilleinjektion ved konferencen i Budapest i '85. Ville evt. gerne kopiere.

Holland:

Forespørgsel fra Dr. O.T Kruijt fra FOM Institute for Plasma Physics "Rijnhuizen" om piller i tokamak. Sendt materiale d.21.10.86. Evt. injektor i 88/89.

England:

Forespørgelse i 1985 og 1986 vedrørende lederørteknik. Forespørgelse i 1986 om injektor til Reversed Field Pinch.

Anden aktiviteter indenfor konstruktion af pilleinjektorer:

Germany, USA, France, Italy, USSR and Japan.

I de 5 førstnævnte lande har vi personlige kontakter, og vi har kendskab til deres arbejdsområderne. Angående Japan vides det, at den kommerzielle koncern Mitshubishi arbejder indenfor området, men eksakt hvad der arbejdes med vides ikke.

Title and author(s) DEVELOPMENT OF H ₂ PELLET INJECTORS FOR INDUSTRIAL MARKETING (In Danish) Torben Visler	Date September 1988
	Department or group Physics Department
	Groups own registration number(s)
	Project/contract no.
Pages 106 Tables 1 Illustrations 27 References 39	ISBN 87-550-1421-6

Abstract (Max. 2000 char.)

1. Discussion of the construction of injector installation at ETA-BETA II
2. Production and experience with two different "pipe-guns". One for large pellets, diameter/length = 4.5-5 mm/8-20 mm and one for small pellets, diameter/length = 2 mm/3-4 mm.

Descriptors - INIS

FUEL PELLETS; PELLET INJECTION; THERMONUCLEAR FUELS

**Rekvireres fra
Risø Bibliotek
Forskningscenter Risø, postbox 49,
4000 Roskilde
Telefon 02 37 12 12, lokal 2262
Telex 43116, Telefax 02 36 06 09**

**ISBN 87-550-1421-6
ISSN 0418-6435**